



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH A VÝROBA VAKUOVÉ FORMY PRO SÉRIOVÉ
TVÁŘENÍ PLASTŮ**

A PROPOSAL AND PRODUCTION OF VACUUM MOLD FOR SERIAL PRODUCTION OF PLASTIC FORMING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Tišnovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jakub Tišnovský**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a výroba vakuové formy pro sériové tváření plastů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce bude návrh a výroba vakuové formy dle zadaného CAD modelu. Práce bude obsahovat teoretický rozbor technologie třískového obrábění, na který naváže konstrukce formy v softwaru PowerShape. V praktické části práce bude řešena výroba modelu z dřevovláknitých desek s následnou výrobou vakuové formy pro sériovou výrobu. Práce bude ukončena technicko–ekonomickým zhodnocením a rozбором navrženého řešení.

Cíle diplomové práce:

- Teoretický rozbor technologie třískového obrábění.
- Konstrukce vakuové formy v softwaru PowerShape.
- Praktická část – výroba vakuové formy.
- Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou formy pro sériovou výrobu plastových dílů vakuovým tvářením. Práce je rozdělena do 2 hlavních kapitol. Teoretická část obsahuje rozbor technologie třískového obrábění. V experimentální části práce je řešena konstrukce formy v softwaru PowerShape a následuje podrobný rozbor výroby modelu pro zaformování a samotné formy. Závěrem experimentální části je pojednáno o ručním dokončení formy a kontrole formy. Práce je ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením, ve kterém jsou řešeny náklady na výrobu formy.

Klíčová slova

Forma, vakuové tvářením, frézování, PowerShape, PowerMill

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the proposal and production of a mold for series production of plastic parts by vacuum forming. The thesis is divided into 2 main chapters. The theoretical part includes analysis of chip machining technology. The experimental part focuses on solving the design of the mold in PowerShape software, a detailed analysis of making of the model for casting and about making of the mold themselves. In the last part the manual completion and verification of the mold is discussed. Thesis is terminated by technical-economic evaluation, in which is discussed about production costs.

Key words

Mold, vacuum forming, milling, PowerShape, PowerMill

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TIŠNOVSKÝ, Jakub. *Návrh a výroba vakuové formy pro sériové tvářením plastů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117239>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **NÁVRH A VÝROBA VAKUOVÉ FORMY PRO SÉRIOVÉ TVÁŘENÍ PLASTŮ** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Bc. Jakub Tišnovský

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D., za ochotu a pomoc při tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mému otci Liboru Tišnovskému za cenné rady a pomoc při výrobě řešené součásti a podporu během celého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 ROZBOR TECHNOLOGIE TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ	9
1.1 Charakteristiky obráběcího procesu.....	9
1.1.1 Obrobek	9
1.1.2 Řezný nástroj	10
1.2 Mechanismus tvorby třísky	11
1.2.1 Koeficient pěchování třísky	13
1.2.2 Objemový součinitel třísek	14
1.2.3 Určení velikostí sil	15
1.2.4 Určení úhlu střížné roviny	17
1.2.5 Určení deformační rychlosti	19
1.2.6 Měrný řezný odpor.....	21
1.2.7 Určení řezných sil	23
1.3 Práce a výkon při procesu řezání	24
1.4 Teplo a teplota v procesu řezání.....	26
2 KONSTRUKCE FORMY	29
2.1 Lisovaný tvar.....	29
2.2 Software a technologické podmínky	30
2.3 Konstrukce formy.....	31
3 VÝROBA FORMY	32
3.1 Model pro zaformování.....	32
3.1.1 Příprava dat pro obrábění modelu v CAD softwaru	32
3.1.2 Tvorba drah pro obrábění	33
3.1.3 Výroba modelu pro zaformování.....	35
3.2 Forma z hliníkové slitiny	39
3.2.1 Obráběcí stroj.....	39
3.2.2 Použité nástroje.....	40
3.2.3 Skořepina z hliníkové slitiny	41
3.2.4 Ustavení odlitku na stroji pro obrobení základny	42
3.2.5 Příprava dat pro obrábění formy v CAD softwaru	43

3.2.6	Obrobení základny a vytvoření technologických otvorů	43
3.2.7	Ustavení odlitku ve stroji pro obrábění tvaru formy	44
3.2.8	Před-dokončovací operace	44
3.2.9	Dokončovací operace	46
3.2.10	Obrábění kontury	47
3.2.11	Vrtání odvzdušňovacích kanálků	48
3.2.12	Broušení formy	48
3.3	Kontrola formy	49
4	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	50
4.1	Cena konstrukce	50
4.2	Cena modelu pro zaformování	50
4.3	Cena formy	50
4.4	Výpočet ceny formy	51
4.5	Rozbor ceny formy	51
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	55
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	58
	SEZNAM PŘÍLOH	59

ÚVOD

Každá doba v dějinách lidstva měla své stěžejní charakteristiky a jednou z nich byl zcela jistě materiál, který lidstvo v dané době nejvíce využívalo. Ať už se jednalo o kámen, bronz, či železo, vždy tento materiál definoval dobu. A zcela stejně je tomu i teď. Dnešní doba by se dala nazývat plastová, neboť míra využití těchto materiálů dosahuje nevídaných rozměrů. Plasty lze najít takřka ve všech odvětvích a automobilní průmysl rozhodně není výjimkou. Míra využití těchto materiálů ale zároveň klade nároky na výrobu zařízení pro výrobu plastických hmot, pro jejich následné zpracování a v neposlední řadě recyklaci.

Technologie tváření plastů je jednou z nejstarších metod zpracování plastů. Při této metodě je za tepla polotovar ve formě desky, nebo fólie, tvarován za pomoci lisu a negativní formy. Vzniklé výlisky mají v závislosti na použitém materiálu dobré mechanické vlastnosti i kvalitu povrchu a jsou používány na různé kryty, kapoty, nádoby, apod. Je zřejmé, že výsledná kvalita výlisků ve velké míře závisí na kvalitě použité formy.

Tato diplomová práce se zabývá výrobou formy pro sériovou výrobu technologií tváření termoplastu, pomocí které bude zákazník schopen vyrábět zadané výlisky v požadované kvalitě.

1 ROZBOR TECHNOLOGIE TŘÍSKOVÉHO OBRÁBĚNÍ

Mnoho výrobních procesů ve strojírenství potřebuje v určité fázi výroby vyrobit rovinné, nebo tvarově složité plochy v určité kvalitě. K výrobě těchto ploch lze využít různé technologie. Bohužel většina technologií je velice nákladná a určena převážně na sériovou výrobu. Za vhodnou variantu se tedy volí obrábění, neboť vůči zmíněným technologiím je rychlé, levné, a hlavně velice variabilní [2, 3].

Třískové obrábění je typ obrábění, při kterém nástroj s určitou geometrií vniká do obráběného materiálu a odděluje třísky. Do třískového obrábění patří: řezání, soustružení, frézování, vrtání, vyhrubování, vystružování, zahlubování, hoblování, obrážení, broušení, superfinišování, lapování a honování [1, 3, 8].

1.1 Charakteristiky obráběcího procesu

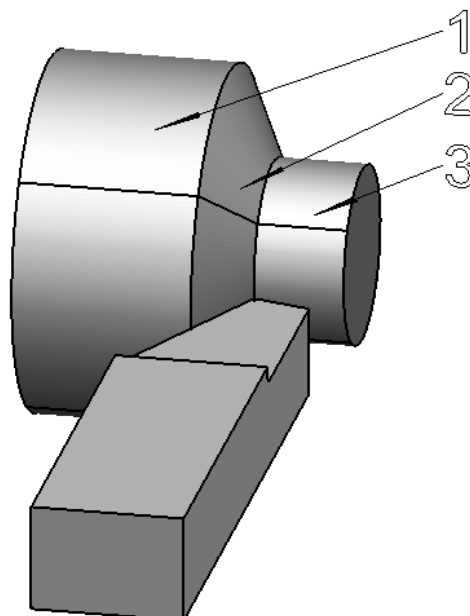
Obráběcí proces je realizován v obráběcím systému a je charakterizován obrobkem, nástrojem a kinematikou řezného procesu.

1.1.1 Obrobek

Obrobek je objektem obráběcího procesu. Obrobek je ten člen obráběcího procesu, který je v procesu obrábění měněn za účelem získání požadovaných rozměrů, struktury povrchu atd. [3-5, 7, 8].

Při obrábění vznikají na obrobku 3 typy ploch (viz obr. 1.1):

- 1 – obráběná plocha,
- 2 – přechodová plocha,
- 3 – obrobená plocha.



Obr. 1.1 Plochy na obrobku [3].

1.1.2 Řezný nástroj

Prvky nástroje

Těleso je část nástroje, na které jsou přímo vytvořené nebo upevněné elementy ostří (obr. 1.2, bod 1) [3].

Stopka je část nástroje určená pro upnutí [3].

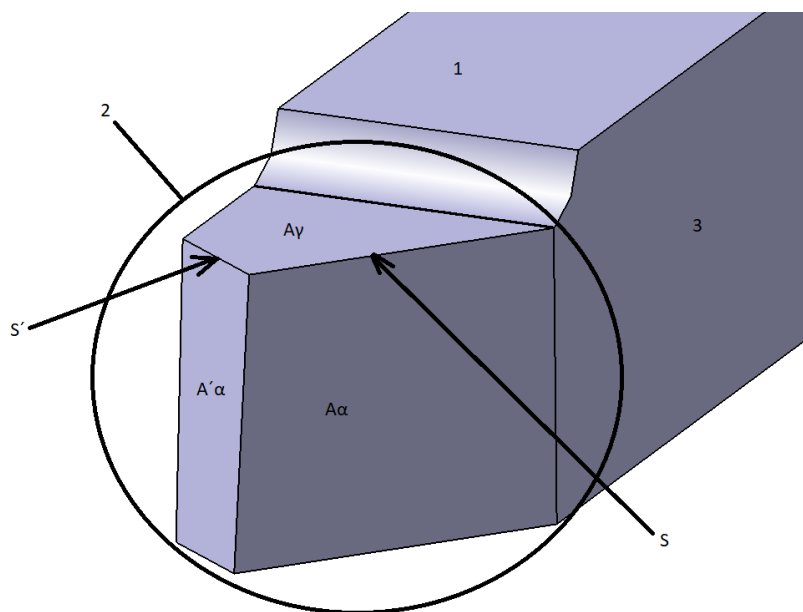
Upínací díra je souhrn vnitřních ploch tělesa nástroje, určených pro nastavení a upnutí nástroje [3].

Osa nástroje je teoretická přímka s definovaným geometrickým vztahem ke stanovenému povrchu, používaná při výrobě, ostření a upnutí nástroje. Obecně je osa nástroje středová čára stopky nebo upínací díry nástroje. Obvykle je rovnoběžná nebo kolmá k danému povrchu nástroje [3].

Řezná část je funkční část nástroje, která obsahuje prvky tvořící třísku. Patří sem zejména ostří, čelo a hřbet. V případě vícebřitého (vícezubého) nástroje má každý břit (zub) svou řeznou část (obr. 1.2, bod 2) [3].

Základna je plochý prvek stopky nástroje, který je zpravidla rovnoběžný nebo kolmý k základní rovině nástroje. Slouží pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, kontrole a ostření. Ne všechny nástroje mají jednoznačně určenou základnu (obr. 1.2, bod 3) [3].

Břit je prvek řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem nástroje. Může být spojený jak s hlavním, tak i vedlejším ostřím [3].



Obr. 1.2 Soustružnický nůž [3].

Plochy na nástroji a jejich označování

Díky systému v označování prvků na nástroji jsme schopni přesně definovat prvek a jeho závislosti na ostatních prvcích. Značka pro plochy se skládá z velkého písmene A a z indexu v podobě písmene řecké abecedy. Index značí typ plochy. Pro vedlejší plochy na nástroji je k značce přidána čárka.

Čelo A_γ je plocha nebo souhrn ploch, po kterých odchází tříska [3]. Čelo má přiřazené malé písmeno γ . Pokud se na nástroji nachází více čel (např. u fréz), značí se tyto čela postupně od ostří připsáním pořadového čísla k indexu. Úhel čela výrazně ovlivňuje proces řezání a trvanlivost nástroje (obr. 1.2) [1, 3, 4, 8].

Hřbet (A_α , A_α') je plocha nebo souhrn ploch, které při řezném procesu směřují k ploše obrobku [3]. K hřbetu nástroje bylo přiřazeno malé písmeno α . Pokud se na nástroji nachází více hřbetů, značí se stejně jako čela připsáním pořadového čísla k indexu a to směrem od ostří nástroje. Úhel hřbetu ovlivňuje tření mezi nástrojem a obrobkem a nesmí být záporný, nebo nulový (obr. 1.2) [1, 3, 4, 8].

Ostří nástroje

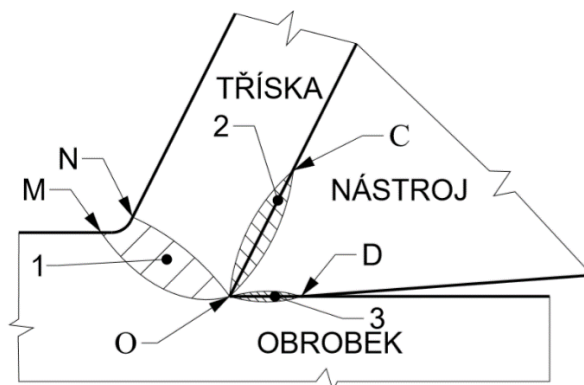
Ostří je prvek řezné části nástroje, kterým se realizuje vlastní proces řezání [3]. K ostří bylo přiřazeno velké písmeno S . Index u ostří definuje, jestli se jedná o pracovní ostří (index e), nebo aktivní ostří (index a). Stejně jako u ploch jsou vedlejší ostří označena čárkou.

Ostří může být značeno jako **Hlavní ostří S** nebo **Pracovní hlavní ostří S_e** . Rozdíl je v tom, že **Hlavní ostří S** je ostří předpokládané, vytvořené na nástroji při výrobě, ale toto ostří se během procesu řezání může měnit, např. v důsledku otupení nástroje, v důsledku špatného nastavení nástroje, apod. Proto byl zaveden pojem „**Pracovní**“, aby bylo možné definovat ostří i během procesu řezání [1, 3, 4, 8].

1.2 Mechanismus tvorby třísky

Při obrábění je přebytečný materiál obrobku oddělován a odchází ve formě třísek. Proces oddělení třísky je tedy stěžejní a určuje většinu požadavků na stroj a nástroj. Tento proces ale zároveň probíhá pro běžné pozorování příliš rychle a je ovlivňován příliš mnoha faktory. Z tohoto důvodu byly přijaty zjednodušení. Tento zjednodušený model se nazývá „Systém pravoúhlého řezání“ [1-5, 7, 8].

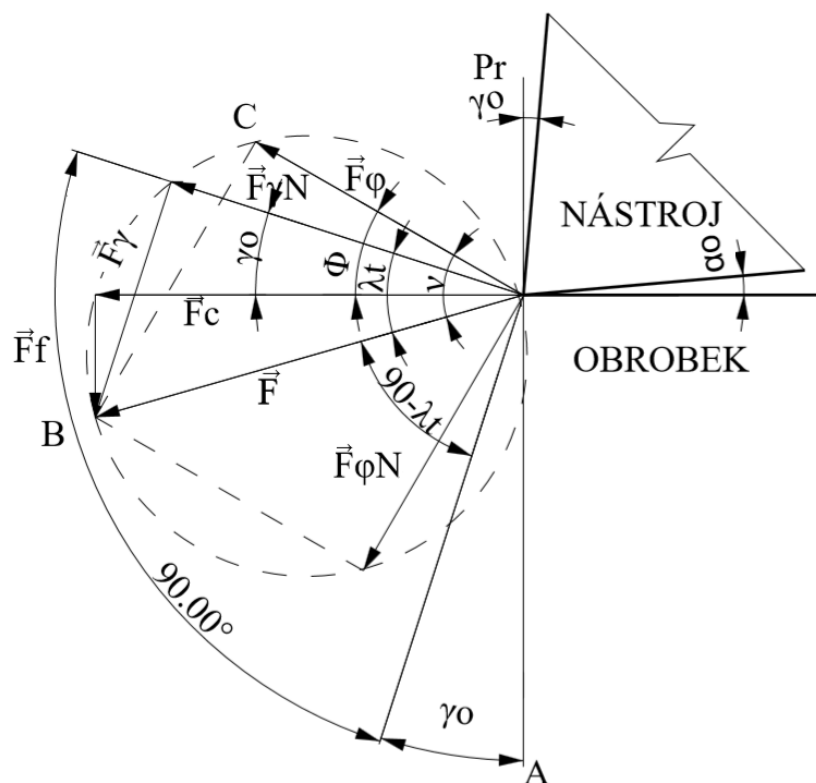
Během procesu řezání lze pozorovat tři oblasti plastické deformace materiálu. První oblast je tvořena před břitem, kde vnikáním břitu do materiálu obrobku vzniká postupně tlakové, kluzné i tahové napětí a až poté je tříska přetvářena a odříznuta břitem nástroje (obr. 1.3, bod 1). Druhá oblast se nachází na čele nástroje, kde oddělená tříska je znovu tvářena v důsledku tlaku a tření o čelo nástroje (obr. 1.3, bod 2). Poslední oblastí je oblast na hřbetě nástroje, kde vlivem pružné deformace se materiál tře o hřbet nástroje a je opět tvářen (obr. 1.3, bod 3). Z tohoto důvodu nemůže být úhel hřbetu nástroje nikdy nulový (jak bylo zmíněno v kap. 1.1.2), neboť by v dané oblasti vznikalo třením významné teplo vedoucí k porušení nástroje [1-5, 7, 8].



Obr. 1.3 Oblasti plastické deformace [7].

Systém pravoúhlého (tzv. ortogonálního) řezání předpokládá dokonale ostrý nástroj, který má ostří kolmé ke směru hlavního pohybu. Materiál obrobku je izotropní, tříska plynulá, hloubka řezu konstantní [1-5, 7, 8].

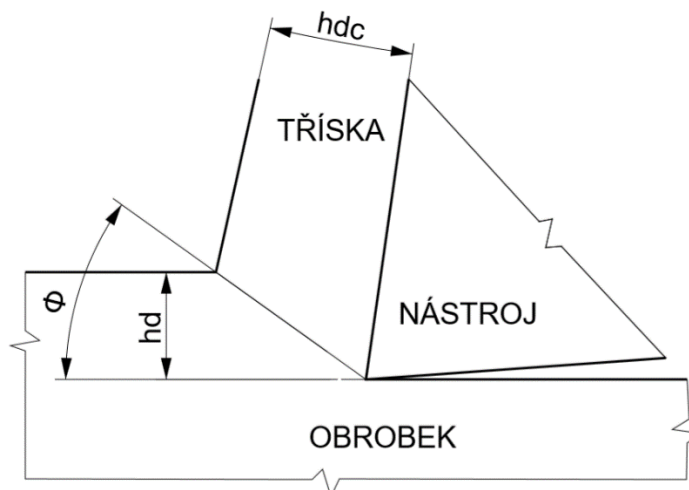
V systému pravoúhlého řezání lze výslednici sil \mathbf{F} rozložit na několik dalších sil v různých směrech. Tento rozklad se provádí z důvodu zjednodušení následných výpočtů, neboť výslednice těchto sil leží rovnoběžně se směry hledaných veličin. Rozklad sil na síly \mathbf{F}_c a \mathbf{F}_f se provádí, pokud budou následně počítány rezné rychlosti, posuvové rychlosti, výkon, nebo bude prováděno měření pomocí dynamometru. Rozklad sil na tečnou a normální složku na čele nástroje \mathbf{F}_γ a $\mathbf{F}_{\gamma N}$ se provádí v případě zkoumání deformace nástroje a výpočtu dalších parametrů rezného procesu. Rozklad do směru maximálních smykových napětí \mathbf{F}_ϕ a $\mathbf{F}_{\phi N}$ se provádí pro popis napjatosti v rovině primární plastické deformace [1-5, 7, 8].



Obr. 1.4 Rozklad sil při ortogonálním řezání [5].

1.2.1 Koeficient přechování třísky

Z důvodu plastických deformací v oblasti primární plastické deformace dochází ke změně tloušťky a šířky třísky při jejím odchodu z místa řezu. Tato změna tloušťky je charakteristická pro různé nastavení řezného procesu a je využívána pro určení úhlu střižné roviny [5, 7, 8].



Obr. 1.5 Určení příčného koeficientu přechování třísky [8].

Koeficient přechování třísky lze určit na základě zákona o zachování objemu. Materiál přichází do procesu řezání se tedy musí rovnat materiálu odebranému. Tedy:

$$\text{Objem odebíraného materiálu } V_{m1} = a_p \cdot f \cdot l = h_d \cdot b_d \cdot l \quad (1.1)$$

$$\text{Objem odebrané třísky } V_{ch} = h_{dc} \cdot b_{dc} \cdot l_c \quad (1.2)$$

$$V_{m1} = V_{ch} \quad (1.3)$$

$$h_d \cdot b_d \cdot l = h_{dc} \cdot b_{dc} \cdot l_c \quad (1.4)$$

(Předpoklad $a_p = b_d$ a $f = h_d$ lze uvažovat jen v případě úhlu nastavení hl. ostří 90°)

kde:

a_p [mm] – šířka záběru ostří,

f [mm] – posuv na otáčku obrobku,

l [mm] – délka pohybu nástroje,

h_d [mm] – odebíraná tloušťka třísky,

b_d [mm] – odebíraná šířka třísky,

h_{dc} [mm] – odebraná tloušťka třísky,

b_{dc} [mm] – odebraná šířka třísky,

l_c [mm] – délka třísky.

Pokud je poměr $b_d:h_d > 5$, lze předpokládat, že $b_d \cong b_{dc}$, tedy:

$$h_d \cdot l = h_{dc} \cdot l_c \quad (1.5)$$

Koeficient přechování třísky je tedy:

$$k_h = \frac{h_{dc}}{h_d} = \frac{l}{l_c} [-] \quad (1.6)$$

1.2.2 Objemový součinitel třísek

Třísky jsou doprovodný produkt procesu řezání a jako takový by měly mít určité potřebné vlastnosti po opuštění prostoru řezu. Z hlediska efektivity výroby je důležité, aby třísky plynule opouštěly pracovní prostor (dlouhé třísky mají tendenci se namotávat na nástroj) a nepoškozovaly obrobený povrch (u dokončeného povrchu). Z hlediska následné manipulace a recyklace je výhodné, pokud třísky zaujímají co nejmenší objem, nemají tendenci utvářet shluky a neucpávají odtoky řezné kapaliny. Z obou těchto podmínek je patrné, že ideální tříska je dělena na jednotlivé elementy. U materiálů, které takovoto třísky netvoří, je třeba změnou geometrie nástroje, použitím lamače třísek, nebo např. změnou řezných podmínek docílit vzniku co nejpřívětivější třísky [1, 3, 5, 7, 8].








Objemový součinitel třísek W je vyjádřen vztahem:

$$W = \frac{V_t}{V_{m2}} [-] \quad (1.7)$$

kde:

V_t [dm³] – objem volně ložených třísek,

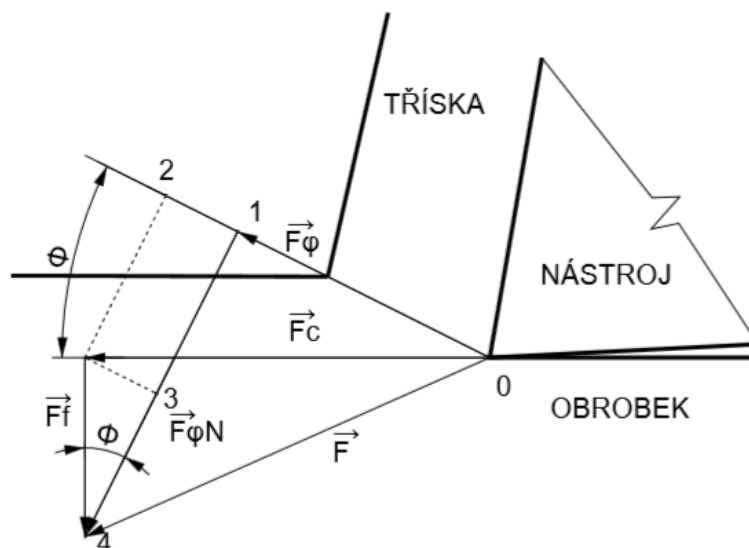
V_{m2} [dm³] – objem odebraného materiálu.

TVAR TRÍSEK		W	TVAR TRÍSEK		W
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 a více		SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400		OBLOUKOVITÉ SPOJENÉ	8 až 10
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150		ELEMENTÁRNÍ	4 až 6
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60			

Obr. 1.6 Hodnoty objemového součinitele třísek pro vybrané tvary třísek [3].

1.2.3 Určení velikostí sil

K určení velikostí jednotlivých složek sil se používají dílčí složky F_c a F_f , které lze přímo změřit při použití dynamometrů. Závislosti mezi složkami jsou určeny z následujícího geometrického modelu [5, 7, 8].



Obr. 1.7 Geometrický model pro výpočet F_ϕ [7].

Z obr. 1.7 je patrné, že:

$$F_\phi = \overline{02} - \overline{12} \quad (1.8)$$

$$\frac{\overline{02}}{F_c} = \cos \Phi \rightarrow \overline{02} = F_c \cdot \cos \Phi \quad (1.9)$$

$$\frac{\overline{12}}{F_f} = \sin \Phi \rightarrow \overline{12} = F_f \cdot \sin \Phi \quad (1.10)$$

Tedy:

$$F_\phi = F_c \cdot \cos \Phi - F_f \cdot \sin \Phi \text{ [N]} \quad (1.11)$$

Obdobně lze určit sílu $F_{\phi N}$:

$$F_{\phi N} = \overline{13} + \overline{34} \quad (1.12)$$

$$\frac{\overline{13}}{F_c} = \sin \Phi \rightarrow \overline{13} = F_c \cdot \sin \Phi \quad (1.13)$$

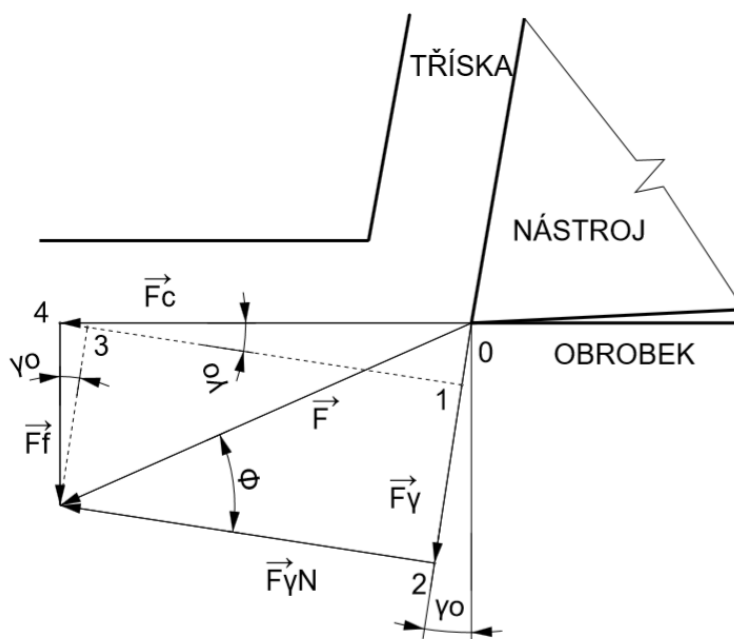
$$\frac{\overline{34}}{F_f} = \cos \Phi \rightarrow \overline{34} = F_f \cdot \cos \Phi \quad (1.14)$$

Tedy:

$$F_{\varphi N} = F_c \cdot \sin \Phi + F_f \cdot \cos \Phi \text{ [N]} \quad (1.15)$$

Z výsledků je patrná závislost sil na velikosti úhlu střižné roviny. Určení velikosti tohoto úhlu bude rozebráno v následující kapitole.

Síly na čele nástroje lze určit z následujícího geometrického modelu.



Obr. 1.8 Geometrický model pro výpočet F_v [7].

Z obr. 1.8 je patrné, že:

$$F_{vN} = \overline{14} - \overline{34} \quad (1.16)$$

$$\frac{\overline{14}}{F_c} = \cos \gamma_o \rightarrow \overline{14} = F_c \cdot \cos \gamma_o \quad (1.17)$$

$$\frac{\overline{34}}{F_f} = \sin \gamma_o \rightarrow \overline{34} = F_f \cdot \sin \gamma_o \quad (1.18)$$

Tedy:

$$F_{\varphi} = F_c \cdot \cos \gamma_o - F_f \cdot \sin \gamma_o \text{ [N]} \quad (1.19)$$

Obdobně lze určit sílu F_y :

$$F_y = \overline{01} + \overline{12} \quad (1.20)$$

$$\frac{\overline{01}}{F_c} = \sin \gamma_o \rightarrow \overline{01} = F_c \cdot \sin \gamma_o \quad (1.21)$$

$$\frac{\overline{12}}{F_f} = \cos \gamma_o \rightarrow \overline{12} = F_f \cdot \cos \gamma_o \quad (1.22)$$

Tedy:

$$F_\phi = F_c \cdot \sin \gamma_o + F_f \cdot \cos \gamma_o \text{ [N]} \quad (1.23)$$

Z výsledků je patrná závislost sil na nástrojovém ortogonálním úhlu čela, který je určen geometrií nástroje.

1.2.4 Určení úhlu střížné roviny

Úhel střížné roviny Φ lze určit z podmínky minimální práce, nebo z koeficientu spěchování třísek [5, 7, 8].

Určení úhlu střížné roviny z podmínky minimální práce

Určení úhlu střížné roviny z podmínky minimální práce předpokládá, že deformační oblast MON z obr. 1.3 lze nahradit jedinou střížnou rovinou a že se materiál chová dle zákona o maximálních smykových napětích [5, 7, 8].

Z obr. 1.3 a obr. 1.4 je patrné, že:

$$F_\phi = \tau \cdot A_{ch} \quad (1.24)$$

$$A_{ch} = \overline{01} \cdot b_d \quad (1.25)$$

$$\frac{h_d}{\overline{01}} = \sin \phi \rightarrow \overline{01} = \frac{h_d}{\sin \phi} \quad (1.26)$$

Zároveň:

$$\frac{F_\phi}{F} = \cos \nu \rightarrow F = \frac{F_\phi}{\cos \nu} \quad (1.27)$$

Pak:

$$F = \frac{\tau \cdot b_d \cdot h_d}{\sin \phi \cdot \cos \nu} \text{ [N]} \quad (1.28)$$

Z obr. 1.4 také vyplývají závislosti jednotlivých úhlů:

$$\{AC\} = \gamma_o + 90 - \gamma_o + \phi \quad (1.29)$$

$$\{AB\} = \gamma_o + 90 - \lambda_t \quad (1.30)$$

Rozdíl úhlů se tedy rovná:

$$\nu = \phi - \gamma_o + \lambda_t \quad (1.31)$$

Při využití těchto závislostí lze rovnici 1.28 přepsat do finálního tvaru:

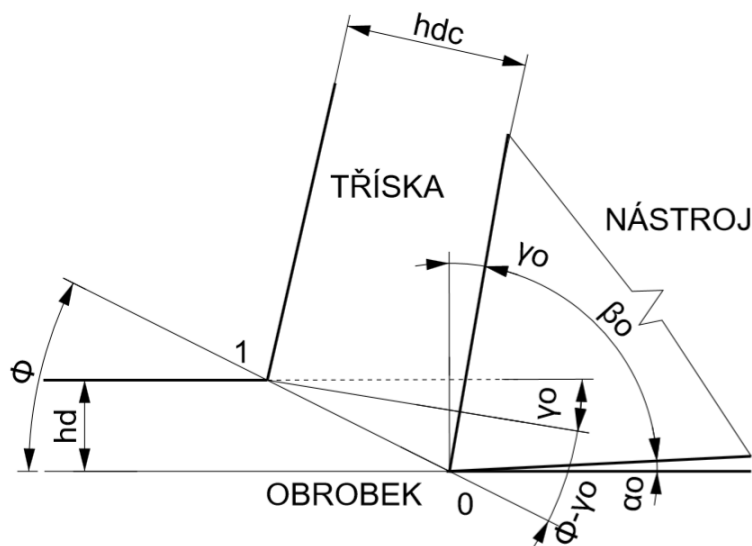
$$F = \frac{\tau \cdot b_d \cdot h_d}{\sin \phi \cdot \cos(\phi - \gamma_o + \lambda_t)} [N] \quad (1.32)$$

Derivací dle úhlu Φ a položením rovno nule lze nalézt extrém dané funkce. Úhel střížné roviny je tedy roven:

$$\phi = 45 + \gamma_o - \lambda_t [^\circ] \quad (1.33)$$

Určení úhlu střížné roviny z koeficientu pěchování třísky

Určení úhlu střížné roviny z koeficientu pěchování třísky je výhodné, protože k výpočtu úhlu jsou třeba pouze třísky a mikrometr [5, 7, 8].



Obr. 1.9 Úhel střížné roviny z koeficientu pěchování třísky [5].

Jak bylo uvedeno v kapitole 1.2.1:

$$k_h = \frac{h_{dc}}{h_d} \quad (1.34)$$

Z obr. 1.9:

$$\frac{h_d}{\overline{01}} = \sin \phi \rightarrow h_d = \overline{01} \cdot \sin \phi \quad (1.35)$$

$$\frac{h_{dc}}{\overline{01}} = \cos(\phi - \gamma_o) \rightarrow h_{dc} = \overline{01} \cdot \cos(\phi - \gamma_o) \quad (1.36)$$

Potom:

$$k_h = \frac{\overline{01} \cdot \cos(\phi - \gamma_o)}{\overline{01} \cdot \sin \phi} \quad (1.37)$$

Jak je známo z teorie obrábění, úhel břitu δ_o je definován jako součet úhlu hřbetu a břitu a zároveň součet úhlu čela a břitu nám dává 90° . Úhel čela tedy lze vyjádřit jako odečet úhlu břitu od 90° . Při aplikaci tohoto vyjádření do rovnice 1.37 lze získat rovnici:

$$k_h = \frac{\cos(\phi - 90 + \delta_o)}{\sin \phi} \quad (1.38)$$

Použitím vztahů goniometrických funkcí lze rovnice 1.38 přepsat do finálního tvaru:

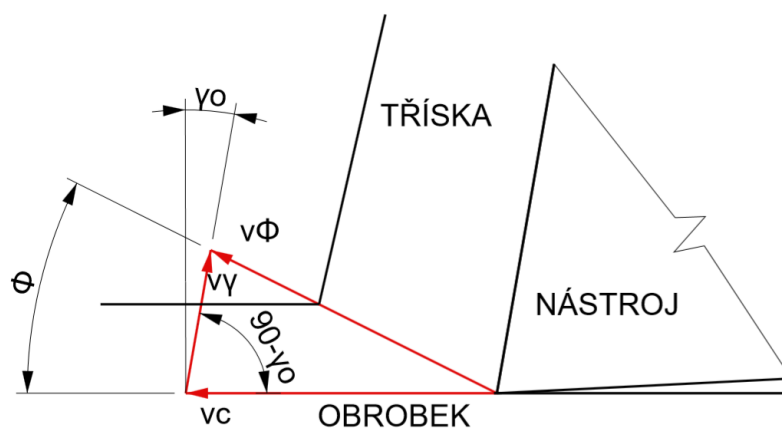
$$\cotg \phi = \frac{k_h - \cos \delta_o}{\sin \delta_o} \quad (1.39)$$

1.2.5 Určení deformační rychlosti

V procesu řezání lze identifikovat tři rychlostní závislosti [5, 7, 8]:

- řezná rychlost v_c ,
- rychlost třísky v_v ,
- skluzová rychlost v_ϕ .

Deformační rychlosti lze vyhodnotit na základě diagramu na obr. 1.10.



Obr. 1.10 Rychlosti v oblasti stříhu [7].

Pomocí sinové věty lze z obr. 1.10 určit následující závislosti:

$$\frac{v_{\phi}}{v_c} = \frac{\sin(90 - \gamma_o)}{\sin(180 - (90 - \gamma_o) - \phi)} = \frac{\cos \gamma_o}{\cos(\phi - \gamma_o)} \quad (1.40)$$

$$\frac{v_{\gamma}}{v_c} = \frac{\sin \phi}{\sin(180 - (90 - \gamma_o) - \phi)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma_o)} \quad (1.41)$$

Potom:

$$v_{\phi} = v_c \cdot \frac{\cos \gamma_o}{\cos(\phi - \gamma_o)} \quad (1.42)$$

$$v_{\gamma} = v_c \cdot \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma_o)} \quad (1.43)$$

Vlastní rychlost deformace je definována jako:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta y \cdot \Delta t} [s^{-1}] \quad (1.44)$$

Poměr $\Delta s/\Delta t$ vyjadřuje změnu posunutí skluzového systému za jednotku času, což ovšem stejně vyjadřuje skluzová rychlost v_{ϕ} . Po dosazení rovnice pro skluzovou rychlost do rovnice pro rychlost deformace tedy dostaneme:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_c}{\Delta y} \cdot \frac{\cos \gamma_o}{\cos(\phi - \gamma_o)} [s^{-1}] \quad (1.45)$$

kde:

Δy – tloušťka vrstvy ve skluzové rovině (obvykle přibližně 25 μm)

Při dosazení hodnot běžně používaných u obrábění lze dostat hodnoty rychlosti deformace v oblasti 10^3 až $10^4 s^{-1}$. Při takto vysokých rychlostech deformace je již patrné zpevnění materiálu a hodnoty např. opotřebení nástrojů jsou vyšší, než by měly být, pokud by byly použity materiálové charakteristiky z běžných zkoušek, např. tahové zkoušky, která probíhá při deformační rychlosti $10^{-3} s^{-1}$ [5, 7, 8].

1.2.6 Měrný řezný odpor

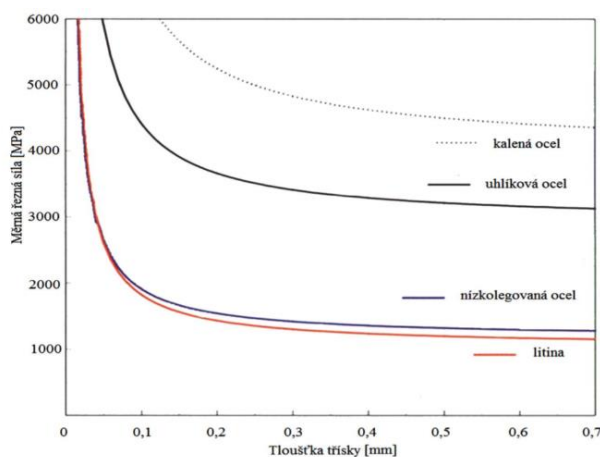
Měrný řezný odpor je definován, podobně jako pevnost materiálu, jako velikost měrné síly potřebné k překonání soudržnosti materiálu účinkem řezného procesu. Měrný řezný odpor lze spočítat dle vztahu 1.46 [1, 3, 5, 7, 8, 10, 11].

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [MPa] \quad (1.46)$$

Měrný řezný odpor je tedy závislost síly ve směru hlavního řezného pohybu vztaženou na průřez třísky v mm^2 . Měrný řezný odpor a měrná řezná síla je označení té samé síly, ale opačně působící, ve smyslu Newtonova zákona akce a reakce. Velikost řezného odporu určují:

- fyzikální vlastnosti materiálu,
- průřez třísky (zejména tloušťka třísky),
- geometrie nástroje,
- řezné prostředí.

Pro snazší určení měrného řezného odporu byly vypracovány grafy a tabulky. Obr. 1.11 zobrazuje určení měrného řezného odporu v závislosti na tloušťce třísky [1, 3, 5, 7, 8, 10, 11].



Obr. 1.11 Závislost měrné řezné síly na tloušťce třísky [9].

Vztah 1.46 zároveň jde upravit pro závislost na posuvu a nastavení geometrie břitu:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{c_{kc}}{b_d^u \cdot h_d^v} \quad (1.47)$$

Jak bylo zmíněno výše, zásadní vliv na měrný řezný odpor má šířka třísky, neboť přímo působí na hodnotu deformační práce. Zmenšení tloušťky třísky vede k růstu zpevnění v oblasti plastických deformací a k růstu poměrné deformační práce [1, 3, 5, 7, 8, 10, 11].

Tedy:

$$k_c = \frac{c_{kc}}{h_d^v} = \frac{k_{c1}}{h_d^{m_c}} \quad (1.48)$$

Potom:

$$k_c = \frac{k_{c1}}{(f \cdot \sin \kappa_r)^{m_c}} [MPa] \quad (1.49)$$

A také pro výpočet dle firmy Sandvik Coromat [10]:

$$k_c = k_{c1} \cdot h^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) [MPa] \quad (1.50)$$

kde:

k_{c1} [MPa] – měrná řezná síla pro břitovou destičku s úhlem nastavení

hl. ostří $\gamma_o = 0^\circ$,

f [mm] – posuv na otáčku,

m_c [-] – koeficient závislý na fyzikálních vlastnostech obrobku,

h [mm] – tloušťka třísky.

Pomocí vzorce 1.50 lze využívat materiály firmy Sandvik Coromat a k určení měrného řezného odporu využít volně přístupné informace, jako např. tab. 1.1.

Tab. 1.1 Měrný řezný odpor dle Sandvik Coromat pro tvrzené oceli [11].

MC kód	Materiálová skupina	Materiálová podskupina	Způsob výroby	Tepelné zpracování	norm.	Měrná řezná síla k_{c1} (N/mm ²)	m_c
H1.1.Z.HA	1 oceli (extra tvrdé)	1	Stupeň tvrdosti 50	Z	HA	50 HRc	0.25
H1.2.Z.HA		2	Stupeň tvrdosti 55	Z	HA	55 HRc	0.25
H1.3.Z.HA		3	Stupeň tvrdosti 60	Z	HA	60 HRc	0.25
H1.4.Z.HA		4	Stupeň tvrdosti 63	Z	HA	63 HRc	0.25
H2.O.C.UT	2 tvrzená litina	0	hlavní skupina	C	UT	55 HRc	0.28
H3.O.C.UT	3 tvrzená litina	0	hlavní skupina	C	UT	40 HRc	
H4.O.C.UT	4 tvrzená litina	0	hlavní skupina	S	AN	67 HRc	

1.2.7 Určení řezných sil

K určení řezných sil při obrábění je použit vzorec 1.46 z předešlé kapitoly.

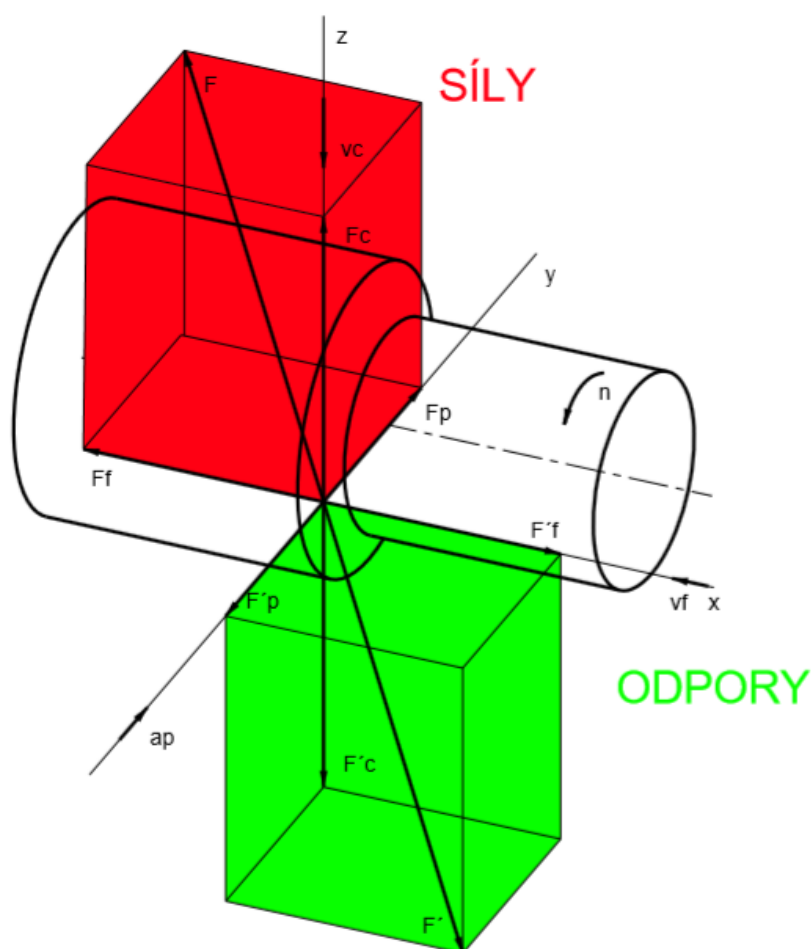
$$\begin{aligned}
 F_c &= A_D \cdot k_c = b_d \cdot h_d \cdot \frac{c_{kc}}{b_d^u \cdot h_d^v} = c_{kc} \cdot b_d^{1-u} \cdot h_d^{1-v} \\
 &= c_{kc} \cdot \left(a_p \cdot \frac{1}{\sin \kappa_r}\right)^{1-u} \cdot (h_d \cdot \sin \kappa_r)^{1-v} \\
 &= c_{kc} \cdot \left(\frac{1}{\sin \kappa_r}\right)^{1-u} \cdot (\sin \kappa_r)^{1-v} \cdot a_p^{1-u} \cdot f^{1-v}
 \end{aligned} \tag{1.51}$$

Z rovnice 1.51 je patrné, že c_{kc} i závorky se siny jsou pouze konstanty, tudíž je lze nahradit a vznikne finální vztah pro řeznou, posuvovou i pasivní sílu [3-5, 7, 8]:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} [N] \tag{1.52}$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} [N] \tag{1.53}$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} [N] \tag{1.54}$$



Obr. 1.12 Řezné síly a odpory při soustružení [3].

1.3 Práce a výkon při procesu řezání

Celková **práce procesu řezání E** se skládá ze složek potřebných k překonání jednotlivých odporů a lze ji vyjádřit jako [3-5, 7, 8]:

$$E = E_p + E_e + E_t + E_{disp} [J] \quad (1.55)$$

kde:

E_p [J] – práce potřebná k překonání plastických deformací v materiálu obrobku,

E_e [J] – práce potřebná k překonání elastických deformací v materiálu obrobku,

E_t [J] – práce tření potřebná k překonání tření na čele a hřbetě nástroje,

E_{disp} [J] – práce potřebná k vytvoření nových povrchů.

Práce procesu řezání se dá také stanovit jako práce potřebná na odebrání určitého množství materiálu ze součtu práce řezání a práce posuvu, tzn. [3-5, 7, 8]:

$$E = E_c + E_f [J] \quad (1.56)$$

Za **práci řezání E_c** lze považovat energii potřebnou k realizování hlavního řezného pohybu [3-5, 7, 8]. Tedy:

$$E_c = \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt \quad (1.57)$$

Práce řezání E_c pro soustružení válcové plochy je tedy vyjádřena následujícím vztahem [3-5, 7, 8]:

$$E_c = F_c \cdot v_c \cdot t_{sous} [J] \quad (1.58)$$

kde:

F_c [N] – řezná síla,

v_c [m.min⁻¹] – řezná rychlost,

t_{sous} [min] – doba trvání řezného procesu.

Za **práci posuvu E_f** lze považovat energii potřebnou k realizování posuvového pohybu [3-5, 7, 8]. Tedy:

$$E_f = \int_0^t F_f \cdot v_f \cdot dt \quad (1.59)$$

Práce posuvu E_f pro soustružení válcové plochy je tedy vyjádřena následujícím vztahem [3-5, 7, 8]:

$$E_f = F_f \cdot v_f \cdot t_{souds} [J] \quad (1.60)$$

kde:

F_f [N] – posuvová síla,

v_c [m.min⁻¹] – posuvová rychlost,

t_{souds} [min] – doba trvání řezného procesu.

Práce řezání pro soustružení válcové plochy vznikne dosazením rovnic 1.58 a 1.60 do rovnice 1.56, tedy:

$$E = (F_c \cdot v_c + F_f \cdot v_f) \cdot t_{souds} [J] \quad (1.61)$$

Měrná práce řezání e_c je řezná práce vztažená na množství odebraného materiálu [3-5, 7, 8]. Tedy:

$$e_c = \frac{E_c}{V_m} [J \cdot cm^{-3}] \quad (1.62)$$

kde:

V_m [cm³] – odebraný materiál procesem řezání.

Výkon je z fyzikálního hlediska určen jako množství práce za jednotku času, tedy [3-5, 7, 8]:

$$P = \frac{E}{t} [W] \quad (1.63)$$

Dosazením vztahu 1.58 do rovnice 1.63 získáme vztah pro **řezný výkon** P_c , tedy:

$$P_c = \frac{E_c}{t} = \frac{F_c \cdot v_c \cdot t_{souds}}{t} = \frac{F_c \cdot v_c}{60} [W] \quad (1.64)$$

kde:

F_c [N] – řezná síla,

v_c [m.min⁻¹] – řezná rychlost.

Obdobně dosazením rovnice 1.60 do rovnice 1.63 určíme vztah pro **výkon potřebný pro posuv Pr**:

$$P_f = \frac{E_f}{t} = \frac{F_f \cdot v_f \cdot t_{sout}}{t} = \frac{F_f \cdot v_f}{60} [W] \quad (1.65)$$

kde:

F_f [N] – posuvová síla,

v_f [m.min⁻¹] – posuvová rychlost.

Pracovní výkon P_e je definován opět stejně, tedy [3-5, 7, 8]:

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60} [W] \quad (1.66)$$

kde F_e je pracovní síla určená vztahem:

$$F_e = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} [N] \quad (1.67)$$

a v_e je výsledná rychlost řezného pohybu určená vztahem:

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} [\text{m. min}^{-1}] \quad (1.68)$$

Měrný řezný výkon p_c se určí jako řezný výkon P_c vztažený na jednotkové množství odebraného materiálu za jednotku času, tedy [3-5, 7, 8]:

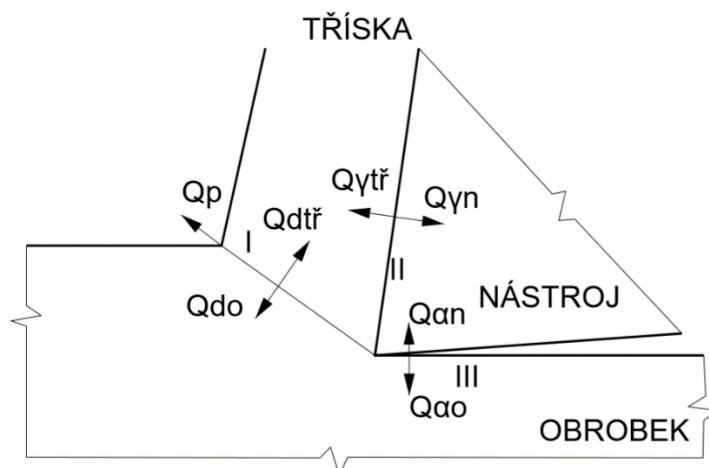
$$p_c = \frac{P_c}{V_m} [W \cdot \text{cm}^{-3}] \quad (1.69)$$

1.4 Teplo a teplota v procesu řezání

V průběhu procesu řezání se takřka všechna mechanická energie mění na tepelnou energii. Dle dostupných zdrojů se hodnota přeměněné energie pohybuje v rozmezí 95 % až 99 %. Hlavní zdroje tepelné energie v procesu řezání (obr. 1.13) se nachází na v následujících oblastech [1-5, 7, 8]:

- oblast roviny maximálních smykových napětí I (oblast primární plastické deformace),
- při čelu nástroje II (oblast sekundární plastické deformace),
- při hřbetu nástroje III vlivem tření o obrobenou plochu.

Zbývá část energie je uložena ve třískách jako elastická energie a ve zbytkovém napětí v obrobeném materiálu.



Obr. 1.13 Teplo v oblasti řezu [7].

Z obr. 1.13 je patrná rovnice vyjadřující rovnováhu mezi zdroji tepelné energie a jejím odvodem z místa řezu. Tuto rovnici nazýváme **tepelnou bilancí** [$\text{J} \cdot \text{min}^{-1}$] řezného procesu a zní [1-5, 7, 8]:

$$Q = Q_D + Q_Y + Q_\alpha = Q_{tř} + Q_o + Q_n + Q_p \cong E_e \quad (1.70)$$

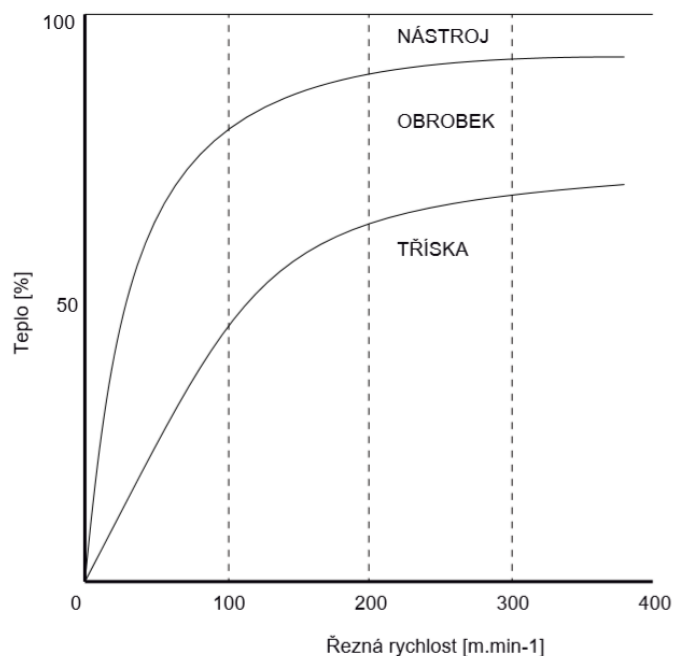
kde:

- Q_D – teplo vzniklé v oblasti primární deformace,
- Q_Y – teplo vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace,
- Q_α – teplo vzniklé v oblasti hřbetu třením o obrobenou plochu,
- $Q_{tř}$ – teplo odvedené třískou,
- Q_o – teplo odvedené obrobkem,
- Q_n – teplo odvedené nástrojem,
- Q_p – teplo odvedené prostředím.

Jak uvádí M. Píška [5] vzniklé teplo výrazně ovlivňuje proces řezání, neboť:

- *negativně působí na řezné vlastnosti nástroje,*
- *ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu,*
- *ovlivňuje přechování a zpevňování obráběného materiálu,*
- *ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje.*

Množství tepla odvedeného jednotlivými možnostmi odvodu (tříska, obrobek, nástroj, prostředí) není konstantní a je výrazně ovlivněno materiálem a technologií obrábění. Odvod tepla při soustružení na sucho schematicky znázorňuje obr. 1.14. Na obrázku není uveden odvod tepla prostředím, neboť tento odvod tepla je zanedbatelný [1-5, 7, 8].



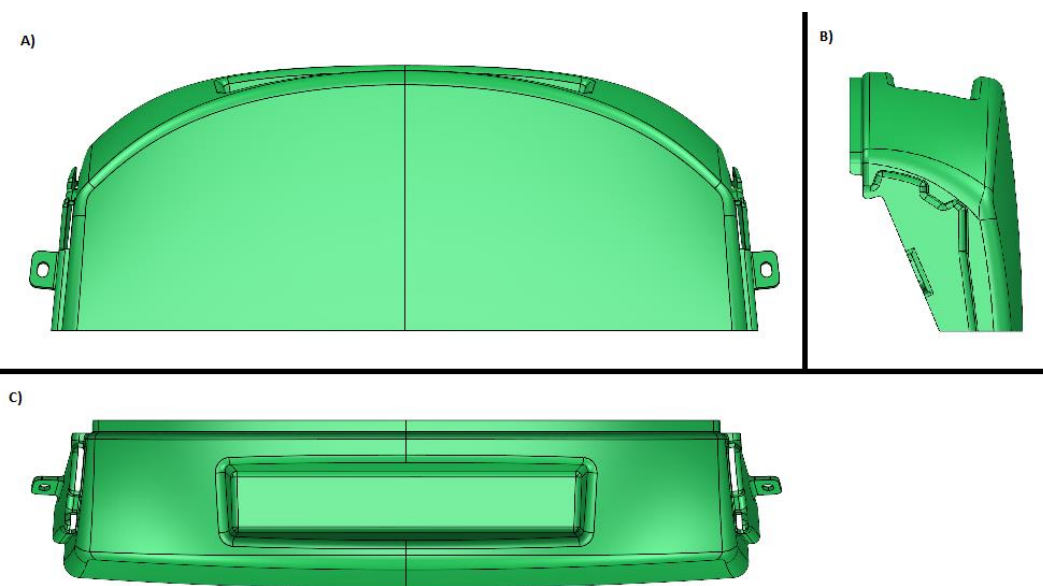
Obr. 1.14 Schematické znázornění odvodu tepla v závislosti na řezné rychlosti [5].

2 KONSTRUKCE FORMY

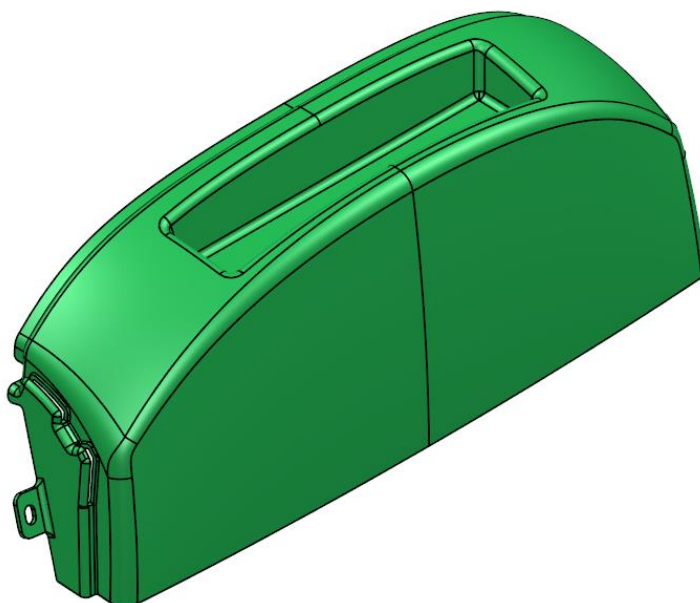
Základní tvar formy vychází z požadovaného tvaru hotového výlisku. Společně s objednávkou je tedy objednavatelem dodán i CAD model hotového výlisku. Z důvodu zvýšení výrobnosti a snížení nákladů byla objednavatelem požadována výroba formy pro současné lisování 2 dílů.

2.1 Lisovaný tvar

Objednavatelem byl dodán model, viz obr. 2.1 a), b), c) a obr. 2.2. Výlisek tohoto tvaru musí být na vyrobené formě vylisovatelný.

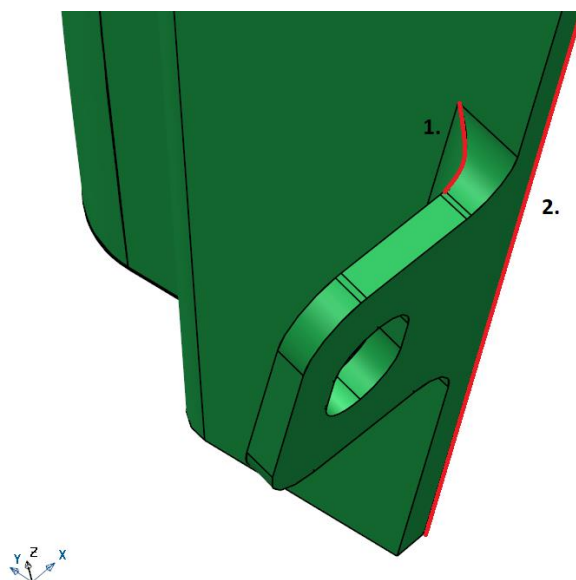


Obr. 2.1 Výlisek: a) pohled z boku, b) pohled zepředu, c) pohled shora.



Obr. 2.2 Izometrický pohled na výlisek.

Na první pohled je patrné, že model nebyl připraven pro výrobu vakuovým tvářením → packy, kterými bude výlisek připevněn na návazné díly, nelze v tomto tvaru vylisovat. Plast má při lisování stále konstantní tloušťku (pokud je zanedbáno zúžení vlivem natahování), nelze tedy vylisovat rádius č.1 a zároveň ostrou hranu č.2 viz obr. 2.3. Po konzultaci s objednavatelem bylo rozhodnuto pro zachování ostré hrany, protože je z hlediska funkčnosti důležitější.



Obr. 2.3 Nevylisovatelná část dílu.

2.2 Software a technologické podmínky

Ke konstrukci formy byl využit technologický 3D CAD Powershape od firmy Delcam Ltd. (nyní již Autodesk Inc.). Tento software je používán namísto dříve používaného softwaru SolidWorks z důvodu výrazně lepší práce s plochami a díky možnostem oprav importovaných dílů od zákazníků.

Při konstrukci formy bylo třeba dbát na základní technologické požadavky metody lisování. Těmi jsou:

- forma musela být zvětšena o 0,8 % z objemu v důsledku smrštění plastu při chladnutí,
- forma musela být prodloužena minimálně 20 mm za ořezovou hranu dílu z důvodu zvlnění a ztenčení plastu na okrajích formy,
- stěny formy musí mít sklon minimálně 3° vzhledem k základně, aby v materiálu vzniklo deformační zpevnění v materiálu.

Dalším omezením bylo vytížení strojů ve firmě a potřeba výroby modelu pro odlití na menší tříosé modelářské frézce. Tedy:

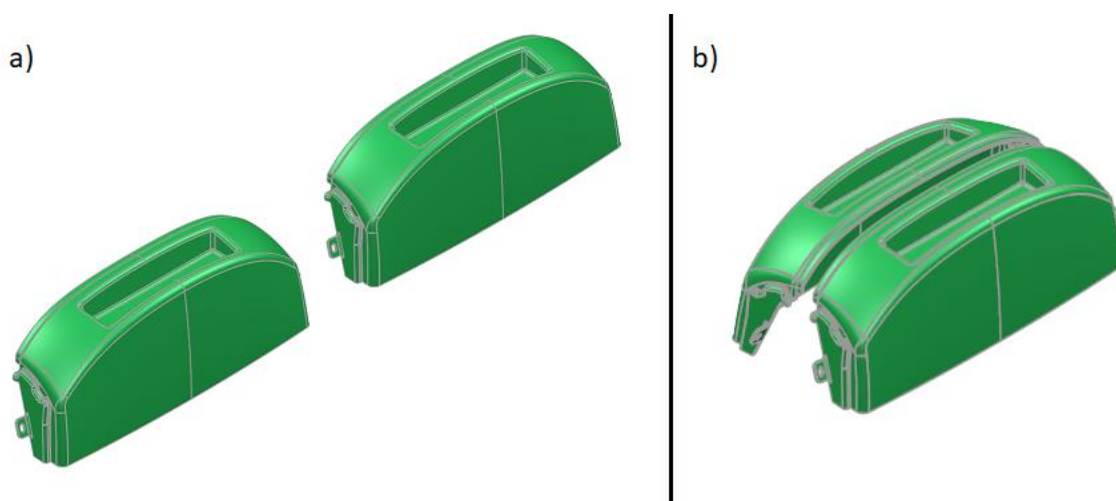
- pracovní oblast frézky je 2300 × 1200 × 650 mm,
- maximální délka vyložení nástroje 200 mm.

2.3 Konstrukce formy

Konstrukce formy byla obdobná, jako v autorově bakalářské práci [28]. Z toho důvodu nebude konstrukce podrobněji probírána.

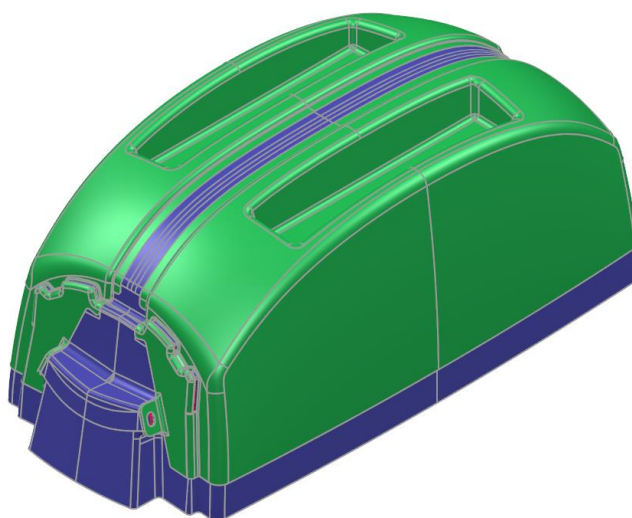
Jak bylo zmíněno dříve, tvar formy vychází z CAD modelu dodaného objednavatelem. Při konstrukci je tedy nejprve model nahrán do softwaru, jsou z něj vybrány potřebné plochy a z nich je tvořena forma. Pomocí funkcí softwaru jsou doplněny otvory v modelu a s přihlédnutím k technologickým podmínkám jsou domodelovány odpadové plochy formy.

Při konstrukci této formy bylo třeba ještě vyřešit umístění druhého výlisku na formě. Na základě zkušeností s výrobou a znalostí strojního vybavení objednavatele, byla varianta a) vyřazena a za optimální rozložení určeno rozložení b) na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Možnosti rozložení dílů: a) varianta 1, b) varianta 2.

Hotovou formu po konstrukci lze vidět na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Hotová forma.

3 VÝROBA FORMY

Výroba formy pro sériovou výrobu vakuovým tvářením se skládá z několika kroků. Oproti výrobě z dřevovláknitých desek, popsané v autorově bakalářské práci, je zde třeba nejprve vyrobit model pro zaformování z dřevovláknitých desek. Po odlití jej opracovat a ručně dokončit vzniklou skořepinu z hliníkové slitiny.

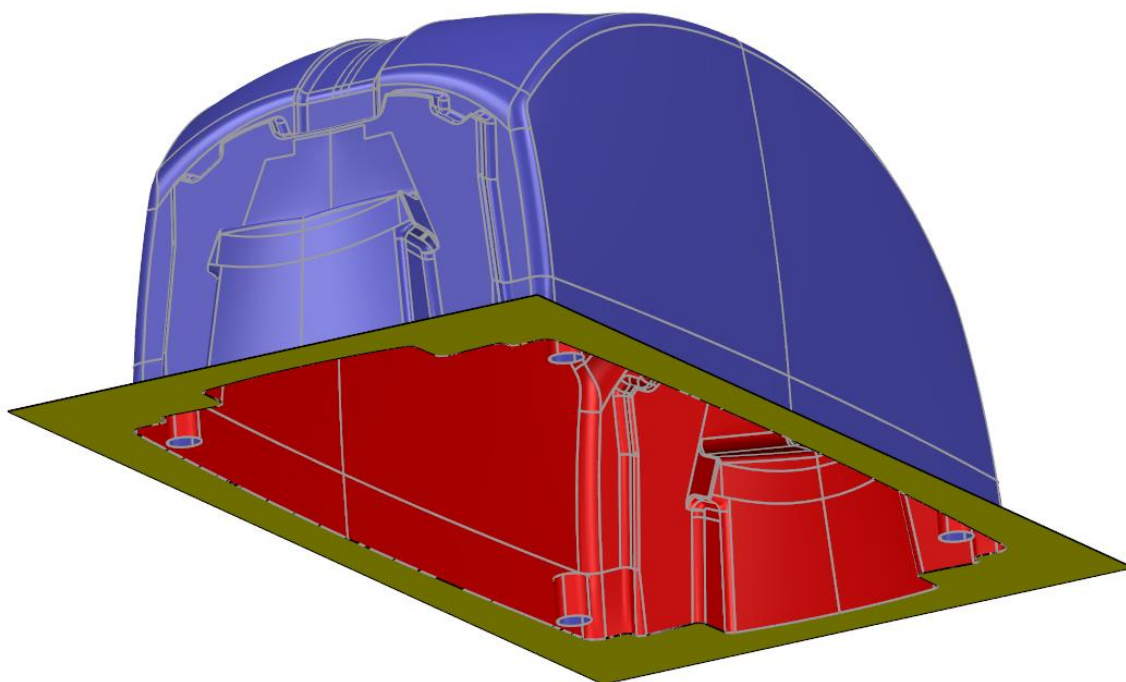
3.1 Model pro zaformování

Pro výrobu modelu byla použita stejná technologie, jaká byla popsána v autorově bakalářské práci.

Rozdílem byl ale fakt, že model pro zaformování nemůže být opracován jen z jedné strany, ale bylo třeba vyrobit jej jako skořepinu pro zaformování. Výroba skořepiny byla dlouhou dobu slabým místem výroby, neboť modelování skořepiny ze složitých tvarových ploch automaticky nefunguje a ručně zabere spoustu času. Proto se od modelování přistoupilo k efektivnější metodě. Skořepina vznikne přiřazením omezení při tvorbě programu pro obrábění daných ploch. Touto metodou nevznikne dokonale přesný tvar zvláště vnitřku skořepiny, ale to pro model na zaformování nevadí a ušetří se 2–5 hodin modelování v závislosti na složitosti a velikosti formy.

3.1.1 Příprava dat pro obrábění modelu v CAD softwaru

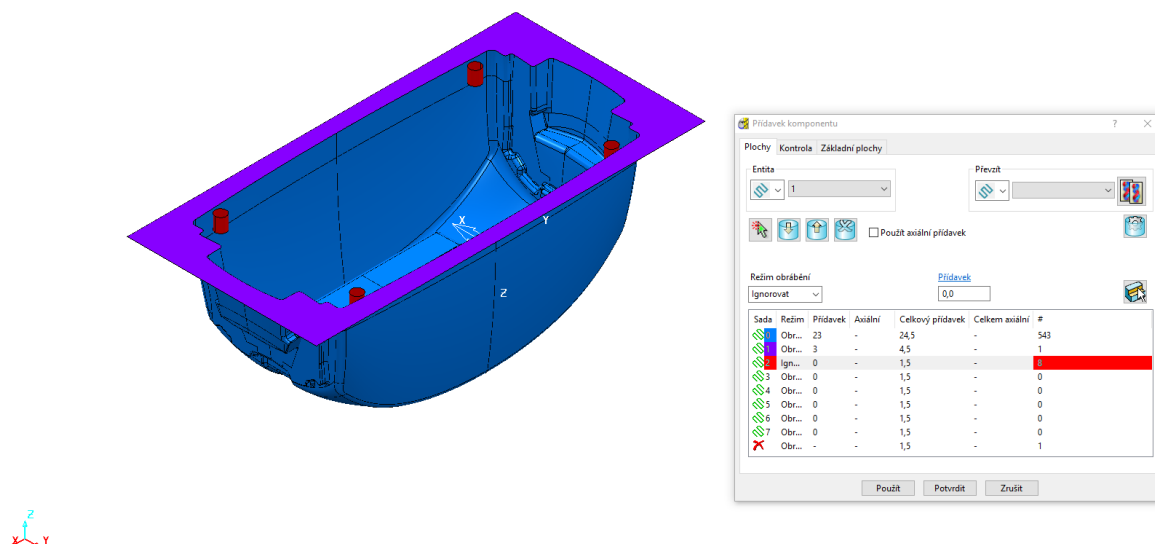
Pro metodu zmíněnou výše bylo třeba upravit zkonstruovanou formu. Do formy byly přidány otvory sloužící k ustavení odlitku, forma byla převedena do ploch, bylo odstraněno dno a k formě byla přimodelována pomocná plocha zastupující v CAM softwaru dno skořepiny. Veškeré vzniklé plochy byly zvětšeny o 1,2 % z objemu z důvodu smrštění hliníkové slitiny při chladnutí. Výsledné data hotová pro CAM software jsou na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Data pro CAM software.

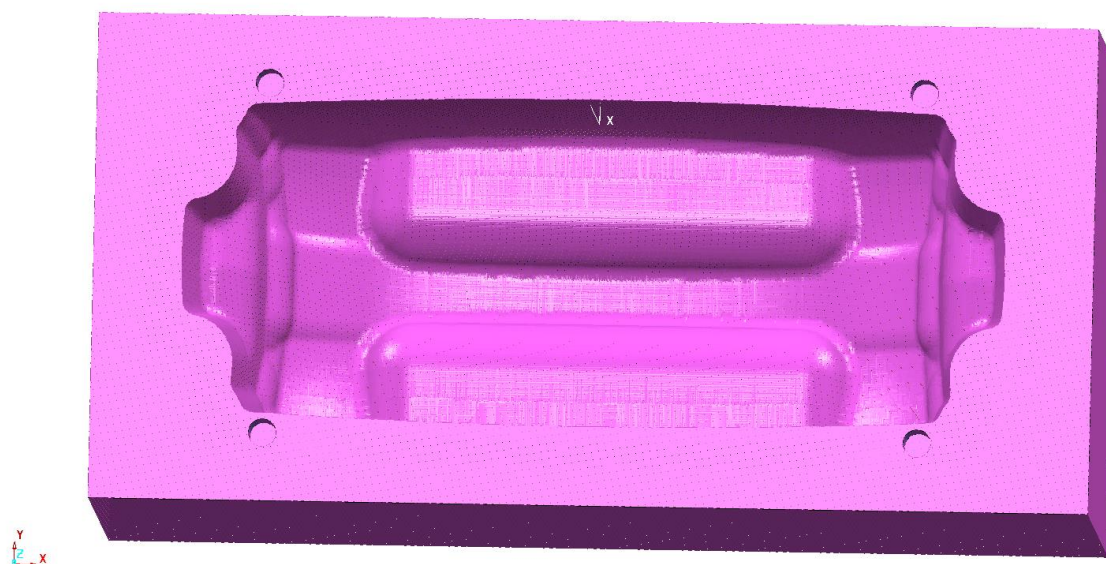
3.1.2 Tvorba drah pro obrábění

Po naimportování dat z CAD softwaru, vytvoření pracovní roviny a vytvoření polotovaru byly přiřazeny omezení pro plochy dle obr. 3.2.



Obr. 3.2 Omezení ploch pro obrábění vnitřku skořepiny.

Přiřazením omezení bylo vše nachystáno pro tvorbu drah. Byly vytvořeny 4 programy na vyhrubování, dokončení, dokončení frézou s větším vyložením a vrtání. O nástrojích a řezných podmínkách použitých při výrobě bude pojednáno v kapitole 3.1.3. Po použití vytvořených programů vznikl tvar, viz obr. 3.3.

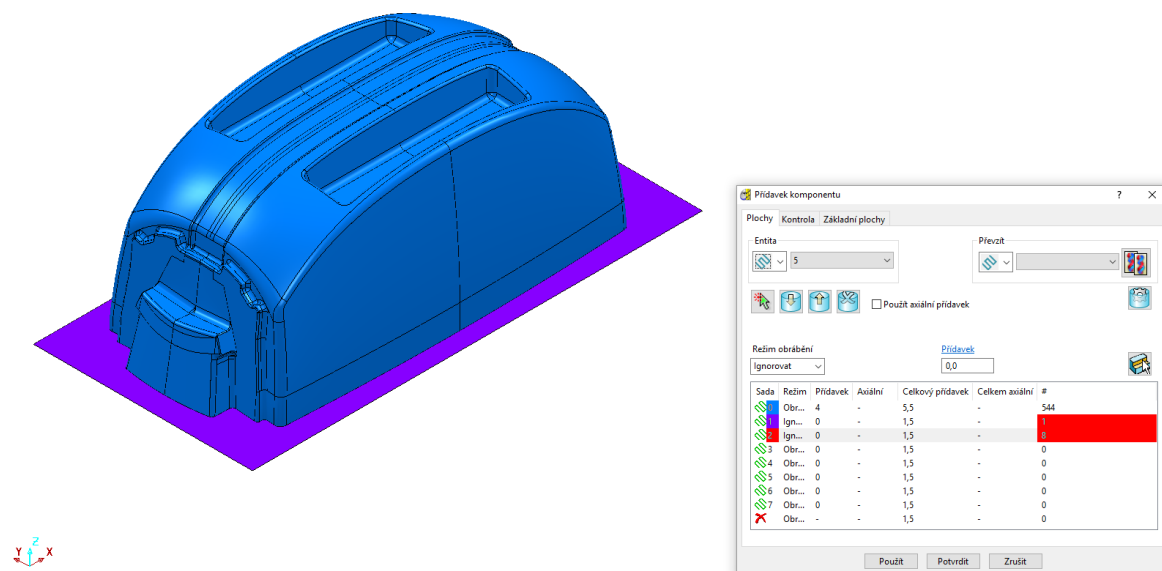


Obr. 3.3 Zbytkový materiál po opracování vnitřku skořepiny.

Z obr. 3.3 je patrná zbytečnost modelování skořepiny. Tvar vytvořený CAM softwarem byl pro nefunkční plochy vnitřku skořepiny zcela dostačující.

Závěrečné vrtání 4 děr do modelu bylo přípravou modelu pro formování. Při formování se do děr usadí 4 jádra a na odlitku vzniknou 4 upínací body pro ustavení odlitku na stroji.

Vyvrtáním děr pro jádra bylo dokončeno opracovávání vnitřku skořepiny. Dále bylo potřeba obrobít vnějšek skořepiny. V CAM softwaru byla tedy vytvořena obrácená pracovní rovina a vytvořeny nové omezení ploch. Jelikož vnější plochy modelu z CAD softwaru už tvořily potřebný povrch, omezeními se přidal pouze přídavek na obrábění, viz obr. 3.4.



Obr. 3.4 Omezení ploch pro obrábění vnějšku skořepiny.

Přiřazením omezení bylo, stejně jako při obrábění vnitřku skořepiny, vše nachystáno pro tvorbu drah. Byly vytvořeny 3 programy na vyhrubování, dokončení a dokončení frézou s delším vyložení. Po použití programů vznikl tvar, viz obr. 3.5.



Obr. 3.5 Zbytkový materiál po opracování vnějšku skořepiny.

3.1.3 Výroba modelu pro zaformování

Polotovár

Jelikož model sloužil pouze pro zaformování do pískových forem, nebyly na něj kladeny téměř žádné pevnostní požadavky. Bylo tedy snahou tento model vyrobit co nejlevněji. K jeho výrobě byly použity dřevovláknité desky (MDF), které se ve firmě používají pro výrobu forem pro kusovou výrobu a s jejichž zpracováním má firma zkušenosti.

Dřevovláknité desky (MDF – Medium Density Fibreboard) jsou vyráběny lisováním dřevěných vláken spojených syntetickým lepidlem za vysoké teploty a tlaku. Desky se používají převážně v nábytkářství a truhlářství. Po nalakování a přebroušení lze u výrobků z dřevovláknitých desek docílit kvalitního hladkého povrchu, který zároveň dokáže odolávat vyšším teplotám [12, 13].

Polotovarem pro výrobu modelu pro zaformování byl kvádr o rozměrech 565 x 275 x 231 mm. Z dřevovláknitých desek, dodávaných ve standardních rozměrech 2750 x 1840 x 18 mm, bylo nařezáno 13 desek. Tyto desky byly slepeny polyuretanovým lepidlem a pro dokonalé slepení ponechány 24 hodin v lisu. Výsledné rozměry vytvořeného polotovaru byly 565 x 275 x 234 mm.

Obráběcí stroj

Pro výrobu z dřevovláknitých desek slouží ve firmě modelářská tříosa CNC frézka SAHOS Sprint FC 2300 – M. Frézku lze vidět na obr. 3.6.

Tab. 3.1 Parametry frézky SAHOS Sprint FC 2300 – M [14].

Rozměry:		Pracovní rozměry:			
Délka	4 160 mm	Pracovní stůl:	2 300 x 1 200 mm		
Šířka	2 800 mm	Pracovní zdvih:	X	Y	Z
Výška	3 300 mm		2 300 mm	1 200 mm	650 mm
Pohon:		Elektropřípojka:			
Maximální rychlost v ose X	62 m.min ⁻¹	Příkon	15 kW		
Maximální rychlost v ose Y	62 m.min ⁻¹				
Maximální rychlost v ose Z	25 m.min ⁻¹				
Krouticí moment motoru X osy	5,3 Nm				
Krouticí moment motoru Y osy	3 Nm				
Krouticí moment motoru Z osy	3 Nm				
Výkon motoru frézovacího agregátu	7,5 kW				
Otáčky frézovacího agregátu	1000 až 18 000 min ⁻¹				



Obr. 3.6 Tříosá CNC frézka SAHOS Sprint FC 2300 – M.

Řezné nástroje

Při volbě řezných nástrojů pro výrobu modelu bylo přihlíženo zvláště k rychlosti výroby. Pro obrábění dřevovláknitých desek bylo využito dvoubřitých nástrojů s hlubší drážkou pro lepší odvod třísek. Použité nástroje viz tab. 3.2 a obr. 3.7.

Tab. 3.2. Použité nástroje pro výrobu modelu.

	D_n e8 [mm]	d_n [mm]	l_n [mm]	L_n [mm]	h_n [mm]	Úhel šroubovice	Materiál	Povlak	Číslo nástroje	Poznámka
Stopková válcová fréza	16	16 h5	100	160	125,0	30°	Slinutý karbid (WC)	TiSiN	1	JJ TOOLS [15]
Stopková kulová fréza	16	16 h6	22	150	135,0	30°	Slinutý karbid (WC)	TiAlN	2	ARNO [16]
Stopková kulová fréza	16	16 h6	100	220	159,5	30°	Slinutý karbid (WC)	-	3	Zakáz. Výroba
Stopková kulová fréza fréza	20	18 h6	26	220	174,8	30°	Slinutý karbid (WC)	-	4	Zakáz. Výroba
Rohová fréza 90° - břitové destičky APKT 1604 PDFR, upnuta na frézovacím trnu	63	22 H7	16	40	195,0	-	Slinutý karbid (WC)	TiAlN+ TiN	5	HHW [17], str. 324



Obr. 3.7 Nástroje pro výrobu modelu.

kde: D_n – průměr břitů frézy,

d_n – průměr stopky frézy,

l – délka ostří frézy,

L – celková délka frézy,

h – délka vyložení frézy z kleštinového upínače.

Řezné podmínky

Řezné podmínky byly zvoleny dle zkušeností s výrobou modelů a forem z dřevovláknitých desek, jelikož žádný z výrobců použitých nástrojů nedodává podmínky pro frézování dřevovláknitých desek, nebo podobných materiálů.

Tab. 3.3 Řezné podmínky při výrobě modelu.

Operace	Přídavek [mm]	Krok [mm]	Krok v ose Z [mm]	Otáčky [min ⁻¹]	Rychlost posuvu [mm/min]	Nástroj
Hrubování vnitřku modelu	1,5	14,50	15,00	10 000	10 000	1
Dokončení vnitřku modelu	-	1,40	0,85	10 000	10 000	2
Zbytkové dokončení vnitřku modelu	-	1,40	0,85	10 000	10 000	3
Vrtání děr pro jádra	-	-	5,00	600	250	1
Hrubování vnějšku modelu	1,5	14,50	15,00	10 000	10 000	1
Dokončení vnějšku modelu	-	1,40	0,85	10 000	10 000	2
Zbytkové dokončení vnitřku modelu	-	1,40	0,85	10 000	10 000	4
Zbytkové dokončení vnitřku modelu	-	40,00	0,50	5 000	10 000	5

Ruční dokončení modelu

Po obrobení modelu přišlo na řadu ruční dokončení. Ruční dokončení se skládá z obroušení modelu smirkovým papírem drsnosti P80, nalakováním formy epoxidovou pryskyřicí a dalším obroušením smirkovým papírem o drsnosti P100.

Model vzniklý obráběním bylo třeba ručně dokončit, jelikož při obrábění dochází k uvolňování jednotlivých vláken dřeva. Zalitím těchto vláken pryskyřicí při lakování by vznikl značně nerovný povrch a následné broušení by trvalo výrazně déle.

Lakování bylo provedeno ručně štětcem a po nalakování byl model ponechán po dobu 24 hodin k vytvrdnutí při pokojové teplotě.

Vytvrzením a následným obroušením byl model hotov. Hotový model lze vidět na obr. 3.8. Stříbrné zabarvení modelu je z důvodu focení až po návratu ze slévárny.



Obr. 3.8 Hotový model.

3.2 Forma z hliníkové slitiny

Výroba formy ze skořepiny namísto z plného bloku materiálu zásadně ovlivňuje cenu formy. Některé kroky, patřící do firemního know-how proto nebudou důkladněji popsány, aby nedošlo k zveřejnění citlivých informací.

3.2.1 Obráběcí stroj

Pro obrábění forem z hliníkových slitin slouží ve firmě pětiosá CNC frézka SAHOS FC 2600 – POWER. Frézku lze ilustrativně vidět na obr. 3.9.

Tab. 3.4 Parametry frézky SAHOS FC 2600 – POWER [14, 20].

Rozměry:					
Délka	4700 mm	Pracovní stůl:	2500 x 1500 mm		
Šířka	4060 mm	Pracovní zdvih	X	Y	Z
Výška	3630 mm		2 600 mm	1 500 mm	850 mm
Pohon		Elektropřípojka			
Maximální rychlost v ose X	40 m.min ⁻¹	Příkon	35 kW		
Maximální rychlost v ose Y	20 m.min ⁻¹				
Maximální rychlost v ose Z	20 m.min ⁻¹				
Krouticí moment motoru osy X	13,5 Nm				
Krouticí moment motoru osy Y	13,5 Nm				
Krouticí moment motoru osy Z	13,5 Nm				
Výkon motoru frézovacího	18 kW				
Otáčky frézovacího agregátu	až 12 000 min ⁻¹				



Obr. 3.9 SAHOS FC 3900 – POWER [21].

3.2.2 Použité nástroje

Nástroje použité pro výrobu byly vybrány na základě strojního vybavení firmy.

Tab. 3.5 Použité nástroje pro výrobu formy.

	D _n [mm]	d _n [mm]	l [mm]	L [mm]	h [mm]	Úhel šroubovice	Materiál	Povlak	Číslo nástroje	Poznámka
Univerzální 3D snímač	-	-	-	-	-	-	-	-	1	HHW [17], str. 582
Čelní fréza 45° - břitové destičky SEHT 1204AFFN- ALU	63	22 H7	6	40	50	-	Slinutý karbid (WC)	-	2	HHW [17], str. 357
Vrták $\phi 7,8$	7,8	7,8	75	117	90	35°	HSS	-	3	Würth [22]
Výstružník $\phi 8$	8 H7	8	38	133	90	-	HSCo	-	4	Würth [23]
Vrták $\phi 6,8$	6,8	6,8	69	109	80	35°	HSS	-	5	Würth [24]
Strojní závitník M8 - upnut v závitorezném pouzdrě s délkovým vyrovnáním DIN 1835	8	-	-	90	-	45°	HSCo	-	6	Würth [25]
Rýsovací jehla	-	-	-	-	-	-	Slinutý karbid (WC)	-	7	Würth [26]
Stopková kulová fréza	16	16 h5	30	130	72	35°	Slinutý karbid (WC)	AlCrN	8	JJ TOOLS [27]
Stopková kulová fréza	10	10 h5	16	100	50	35°	Slinutý karbid (WC)	AlCrN	9	JJ TOOLS [27]
Stopková kulová fréza	8	8 h5	14	90	40	35°	Slinutý karbid (WC)	AlCrN	10	JJ TOOLS [27]
Stopková kulová fréza	2	6 h5	4	50	20	35°	Slinutý karbid (WC)	AlCrN	11	JJ TOOLS [27]

3.2.3 Skořepina z hliníkové slitiny

Po výrobě modelu následovala jeho expedice do slévárny, kde byl osazen jádry a zaformován do pískové formy.

Pro formy na tváření plastů je používána hliníková slitina ČSN 42 43 84 (AlSi10CuMn). Chemické složení slitiny je uvedeno v jakostním osvědčení v příloze 1, mechanické vlastnosti v tab. 3.6. Odlitek ve stavu po dodání ze slévárny je zobrazen na obr. 3.10.

Tab. 3.6 Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny [18, 19].

Norma	Označení	Pevnost min. [MPa]	Tažnost A ₅ inf. [%]	Tvrдость min. [HB]
ČSN 42 43 85	AlSi10CuMn	140	1	50

Izometrický pohled



Pohled na vnitřek skořepiny



Obr. 3.10 Skořepina z hliníkové slitiny.

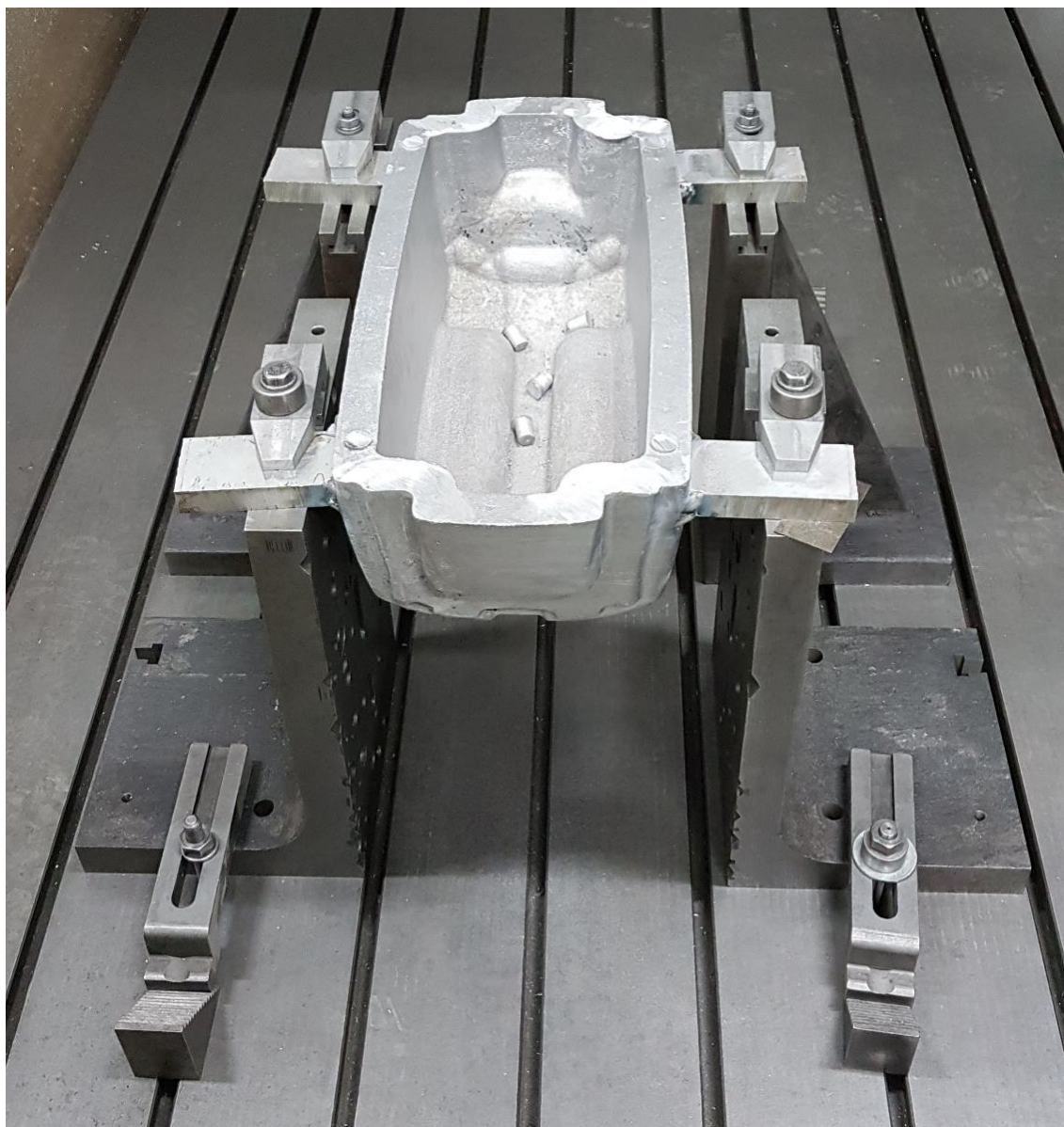
3.2.4 Ustavení odlitku na stroji pro obrobení základny

Tvarově složité skořepiny je třeba na stroji upnout. Jelikož se ale jedná o výhradně kusovou výrobu, nelze použít speciální přípravky. Z toho důvodu byl ve firmě vyvinut speciální systém ustavení, díky kterému lze rychle a snad ustavit jakýkoliv odlitek.

Prvním krokem bylo přivaření pomocných upínacích bodů metodou TIG na odlitek v místě nálitků na základnu. Upínací body jsou přivařeny jen ze 3 stran, aby spojení zajišťovalo dostatečnou tuhost pro obrábění, ale aby upínací body bylo možné po výrobě základny lehce odstranit.

Ve druhém kroku se pomocí přípravku vyvrtají do 2 upínacích bodů otvory, které slouží k vyrovnaní odlitku vzhledem ke stojkám na stroji. Po vyvrtání otvorů jsou odříznuty nálitky na základně.

Následně je odlitek umístěn na stroj, na kterém jsou již nachystány stojky, pomocí děr vyrovnan a pomocí upínek upnut, jak lze vidět na obr. 3.11.



Obr. 3.11 Upnutí odlitku ve stroji.

3.2.5 Příprava dat pro obrábění formy v CAD softwaru

Pro tvorbu drah na výrobu formy byl použit zkonstruovaný tvar formy vytvořený při konstrukci, pouze opět zvětšený o 1,2 % z objemu z důvodu smrštění hliníkové slitiny při chladnutí.

3.2.6 Obrobení základny a vytvoření technologických otvorů

Tvorba drah pro vytvoření základny a technologických otvorů začala vytvořením pracovní roviny souhlasné s nulovým bodem vytvořeným při upínání odlitku ve stroji. Tímto bodem je jeden ze dvou otvorů vyvrtaných do pomocných upínacích bodů, určený pomocí univerzálního 3D snímače.

Následovalo vytvoření drah pro zarovnání prozatímní základny. Ačkoliv model v CAM softwaru obsahuje dno, reálný odlitek ho nemá. Byla tedy vytvořena obrysová křivka dna, vyofsetována o polovinu tloušťky skořepiny a po ní poslána čelní fréza. Byl odebrán přírůstek 4 mm, vytvořený omezením při výrobě modelu.

V dalším kroku bylo třeba zkontrolovat, jestli nulový bod obrobku opravdu souhlasí s nulovým bodem v CAM softwaru. Byla vytvořena dráha pro naznačení obrysu výsledné formy na prozatímní základně a po této dráze poslán stroj osazený rýsovací jehlou. Pokud by vzdálenost obrysu od hran skořepiny nebyla konstantní, musela by se provést korekce nulového bodu. Po zkorigování nulového bodu byla základna snížena o 0,5 mm na čisto.

Nakonec byly vyvrtány technologické otvory. 2 kalibrické díry $\varnothing 10$ H7 a 4 x M8. Hotové dno formy lze vidět na obr. 3.12, řezné podmínky v tab. 3.7.

Tab. 3.7 Řezné podmínky při obrábění základny a řezání otvorů.

Operace	Přídavek [mm]	Krok [mm]	Krok v ose Z [mm]	Otáčky [min^{-1}]	Rychlost posuvu [mm/min]	Nástroj
Zarovnání základny	-	-	1,50	6 500	5 500	2
Obrys formy	-	-	0,50	9 000	5 500	7
Vrtání děr $\varnothing 7,8$	-	-	5,00	1 600	250	3
Vystružování děr $\varnothing 8$ H7	-	-	-	600	250	4
Vrtání děr $\varnothing 6,8$	-	-	5,00	1 800	250	5
Řezání závitů M8	-	-	-	398	498	6



Obr. 3.12 Hotové dno formy.

3.2.7 Ustavení odlitku ve stroji pro obrábění tvaru formy

S hotovým dnem formy bylo přikročeno k dalšímu kroku procesu. Byly odstraněny pomocné upínací body, vnitřní hrana dna odjehlena a forma osazena dalšími 4 upínacími body, sloužícími pro upnutí ve stroji. Odlitek osazený novými pomocnými upínacími body lze vidět na obr. 3.13. Ustavení odlitku ve stroji bylo prováděno pomocí speciálního přípravku a univerzálního 3D snímače. Byl vytvořen nový nulový bod obrobku, tentokrát ve středu jedné z kalibrických děr $\varnothing 10\text{ H7}$. Ustavený odlitek ve stroji lze vidět na obr. 3.14.



Obr. 3.13 Odlitek osazený packami.



Obr. 3.14 Odlitek usazený ve stroji.

3.2.8 Před-dokončovací operace

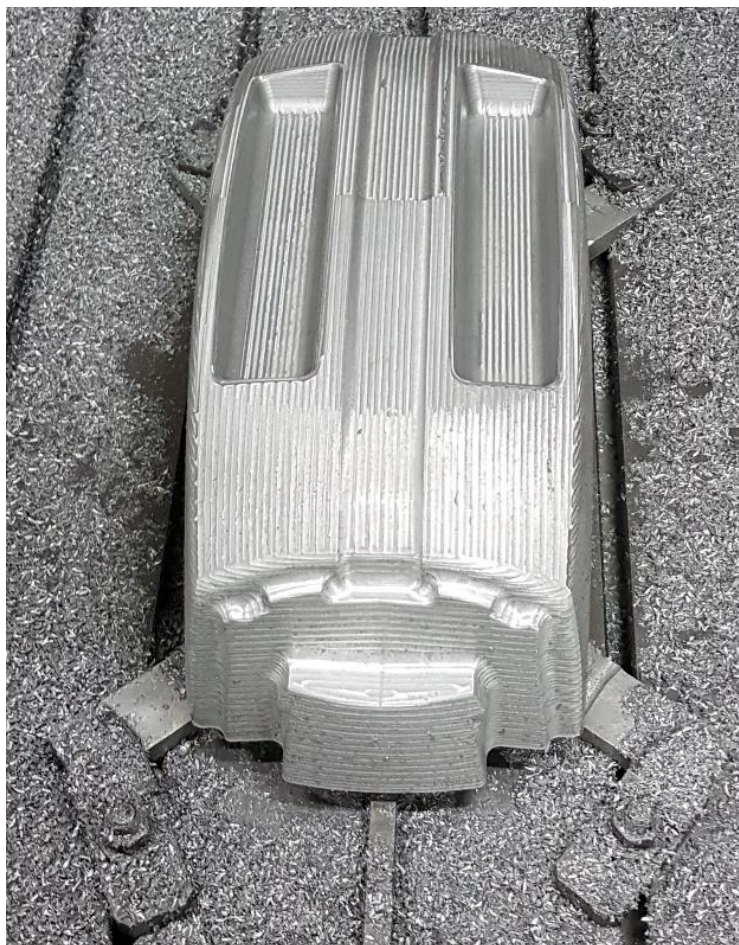
Ustavením odlitku na stroji bylo vše nachystáno pro obrábění. Jelikož byla frézována skořepina s přídavkem a nikoliv z plného bloku, bylo možné vynechat operaci hrubování.

Před-dokončovací operace byly rozděleny do několika programů v závislosti na vyklonění osy nástroje. Vyklonění bylo prováděno pomocí parametrů na stroji a programováním na střed nástroje. Zároveň bylo při obrábění použito dodatečné zpevnění vřetena.

Pro tvorbu programů byla použita strategie „obrábění strmé a plošné“ se zvětšeným limitním úhlem na 40° . Před-dokončenou formu lze vidět na obr. 3.15, řezné podmínky v tab. 3.8.

Tab. 3.8 Řezné podmínky při před-dokončování.

Operace	Přídavek [mm]	Krok [mm]	Krok v ose Z [mm]	Otáčky [min ⁻¹]	Rychlost posuvu [mm/min]	Nástroj
Před-dokončení plošné vršku formy	0,60	3,50	2,75	9 000	5 200	8
Před-dokončení rohů vršku formy	0,60	-	1,00	9 000	5 200	8
Před-dokončení kapes	0,60	3,50	2,75	9 000	5 200	8
Před-dokončení stěn	0,60	3,50	2,75	9 000	5 200	8
Před-dokončení podkosů	0,60	3,50	2,75	9 000	5 200	8



Obr. 3.15 Před-dokončená forma.

Jak je patrné na obr. 2.5, forma obsahuje 4 místa s podkosem. Tyto místa bylo nutné obrábět v 5-osách již z programu a byla obrobena závěrem před-dokončení.



Obr. 3.16 Vybrání zbytků na před-dokončené formě.

3.2.9 Dokončovací operace

Pro dokončovací operace byly využity stejné strategie jako pro před-dokončení z důvodu vzhledu povrchu. Byl použit řezný nástroj číslo 8.

Po dokončení řezným nástrojem číslo 8 bylo potřeba ještě pomocí strategie „dokončení rohu“ nástroji 9, 10 a 11 obrobít zbytkový materiál v rádiusech. Dokončenou formu lze vidět na obr. 3.17, řezné podmínky v tab. 3.9.

Tab. 3.9 Řezné podmínky při dokončování.

Operace	Přídavek [mm]	Krok [mm]	Krok v ose Z [mm]	Otáčky [min ⁻¹]	Rychlost posuvu [mm/min]	Nástroj
Dokončení plošné vršku formy	-	0,48	-	9 000	5 500	8
Dokončení kapes	-	0,48	0,4	9 000	5 500	8
Dokončení rohů vršku formy nástrojem o ø16 mm	-	0,75	-	9 000	5 500	8
Dokončení stěn formy	-	0,48	0,4	9 000	5 500	8
Dokončení rohů vršku formy nástrojem o ø10 mm	-	0,75	-	9 000	5 500	9
Dokončení podkosů nástrojem o ø16 mm	-	0,48	0,38	9 000	5 500	8
Dokončení podkosů nástrojem o ø8 mm	-	0,48	0,38	9 000	5 500	10
Dokončení rohů vršku formy nástrojem o ø2 mm	-	0,48	-	9 000	5 500	11



Obr. 3.17 Dokončená forma.

3.2.10 Obrábění kontury

Poslední operací na frézce bylo vytvoření ořezové kontury na formě. Kontura se na formě vyznačuje, protože po vylisování se kontura prokreslí i na výlisek a dělník ví, kde výlisek oříznout.

Kontura byla vytvořena pomocí strategie „dokončení víceosou křivkou“ a byl použit řezný nástroj číslo 7. Konturu lze vidět na obr. 3.18, řezné podmínky v tab. 3.10.

Tab. 3.10 Řezné podmínky při obrábění kontury.

Operace	Přídavek [mm]	Krok [mm]	Krok v ose Z [mm]	Otáčky [min ⁻¹]	Rychlost posuvu [mm/min]	Nástroj
Obrobení kontury	-	-	0,5	9 000	5 500	7



Obr. 3.18 Forma s konturou.

Po obrobení kontury je forma z hlediska použití frézky hotová a přistupuje se k ručnímu dokončení.

3.2.11 Vrtání odvězdušňovacích kanálků

První z ručních operací, použitých na formě, bylo vyvrtání odvězdušňovacích kanálků. Kanálky jsou do formy vrtány, aby zabránily uvěznění vzduchu v kapsách a vylisování rozdílného tvaru, než má forma. Kanálky byly do formy vrtány pomocí ruční elektrické vrtačky a vrtáku o průměru 1,2 mm. Vrtáky takto malého průměru jsou použity, aby nedošlo k prolisování kanálku do pohledové strany výlisku a tím k jeho znehodnocení. Vyvrtané kanálky je možné vidět na obr 3.19.

3.2.12 Broušení formy

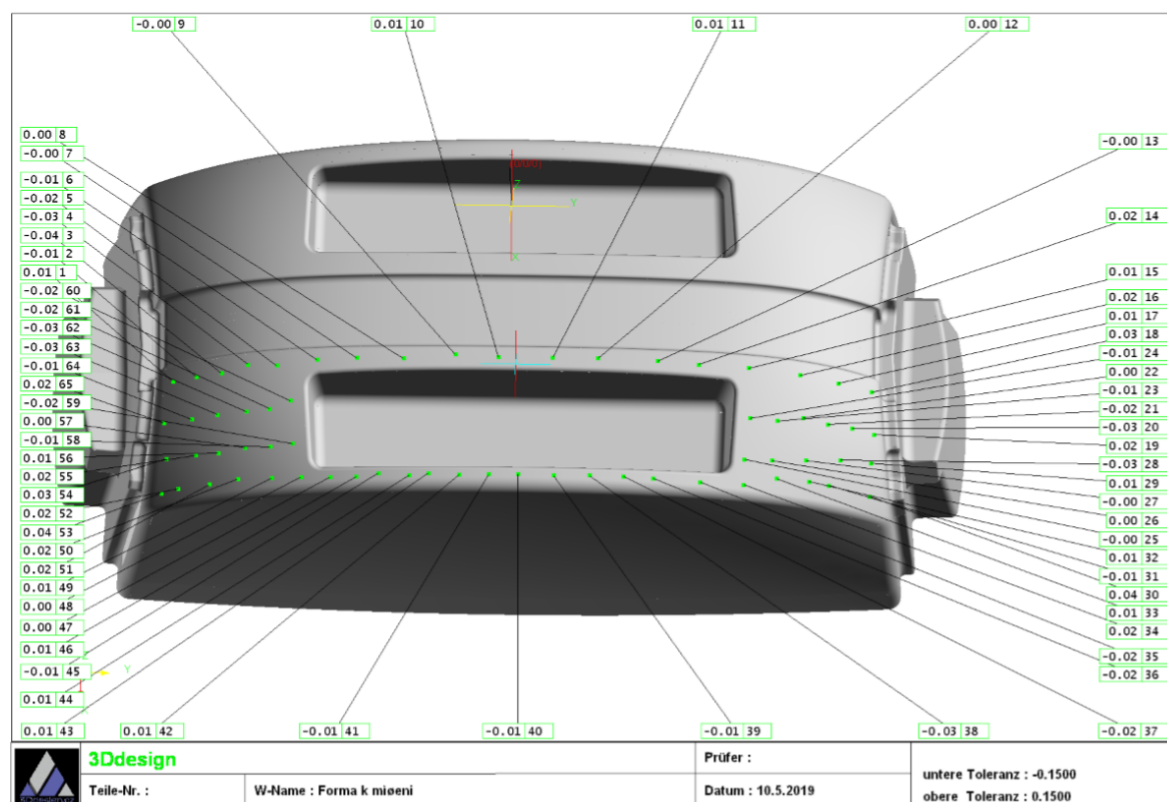
Po vyvrtání odvězdušňovacích kanálků byla forma broušena pro odstranění řádkování z frézování a případných rýh vzniklých při zlomení vrtáku. Broušení bylo prováděno na několik kroků smirkovými papíry o zrnitostech P80, P120 a P150. Na závěr byla forma přebroušena brusnou vlnou o zrnitosti P180.



Obr 3.19 Hotová forma

3.3 Kontrola formy

Dokončená forma byla odeslána k změření na 3D souřadnicovém měřicím přístroji. Tolerance pro výrobu formy byla $\pm 0,15$ mm. Ačkoliv se tolerance může zdát pro CNC stroj zbytečně vysoká, je v ní zohledněno ruční broušení formy. Výsledek měření vrchního tvaru formy lze vidět na obr. 3.20. Celý protokol měření lze najít v příloze 2 – 9.



3.20 Výstupní protokol měření vrchního tvaru formy.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Celková výrobní cena formy se odvíjí od cen jednotlivých nutných kroků k výrobě formy. Celková výrobní cena formy tedy bude součtem nákladů na konstrukci, výrobu modelu a výrobu formy.

Pro výpočty byly uvedeny pouze ilustrativní hodinové sazby.

4.1 Cena konstrukce

Cena konstrukce C_k se odvíjí od složitosti výlisku a požadavků zákazníka. Jelikož se jednalo o dvojformu a poskytnutá data výlisků vyžadovala úpravu (viz kapitola 2.1), konstrukce zabrala 3 hodiny. Při hodinové sazbě 300 Kč/hod bylo za konstrukci účtováno 900 Kč.

4.2 Cena modelu pro zaformování

Zásadním faktorem ovlivňujícím cenu modelu je použitý materiál. Při výrobě z použitých MDF desek je cena modelu počítána z následujících položek.

Cena materiálu

Na slepení polotovaru bylo třeba 13 desek o rozměrech 565 x 275 mm. Plocha všech desek tedy byla 2,02 m². Při ceně tabule 2750 x 1840 mm (5,06 m²) MDF desky 900 Kč/ks byla cena materiálu $C_m = 359$ Kč.

Cena lepidla

Na slepení polotovaru bylo využito půl lahve polyuretanového lepidla v ceně 275 Kč. Cena lepidla C_l byla tedy 137,5 Kč.

Cena programování a obrábění modelu

Model byl obráběn 7 hodin. S cenou hodiny provozu stroje 900 Kč/hod byla cena programování a obrábění $C_{om} = 6\,300$ Kč.

Cena pryskyřice

Na napuštění modelu by spotřebováno 0,6 kg pryskyřice. S cenou 70 Kč/kg byla cena pryskyřice $C_{prs} = 42$ Kč.

Cena broušení modelu

Broušení modelu trvalo 2 hodiny. Bylo provedeno brigádníkem s hodinovou sazbou 120 Kč/hod. Náklady na broušení $C_{br} = 240$ Kč.

4.3 Cena formy

Cena formy se skládá z nákladů na odlitek, z nákladů na programování a obrábění formy a z nákladů na ruční dokončení formy.

Cena odlitku

Cena odlitku ze slévárny se odvíjí od váhy odlitku. Sazba slévárny je 135 Kč/kg. Skořepina vážila 21 kg, cena odlitku C_{odl} je tedy 2 835 Kč.

Cena programování a obrábění formy

Forma byla obráběna 12 hodin. S cenou hodiny provozu stroje 1 600 Kč/hod byla cena programování a obrábění $C_{of} = 19\,200$ Kč.

Cena ručního dokončení formy

Dokončovací práce na formě trvaly 4 hodiny a byly provedeny brigádníkem s hodinovou sazbou 120 Kč/hod. Náklady na ruční dokončení formy $C_{rd} = 480$ Kč.

4.4 Výpočet ceny formy

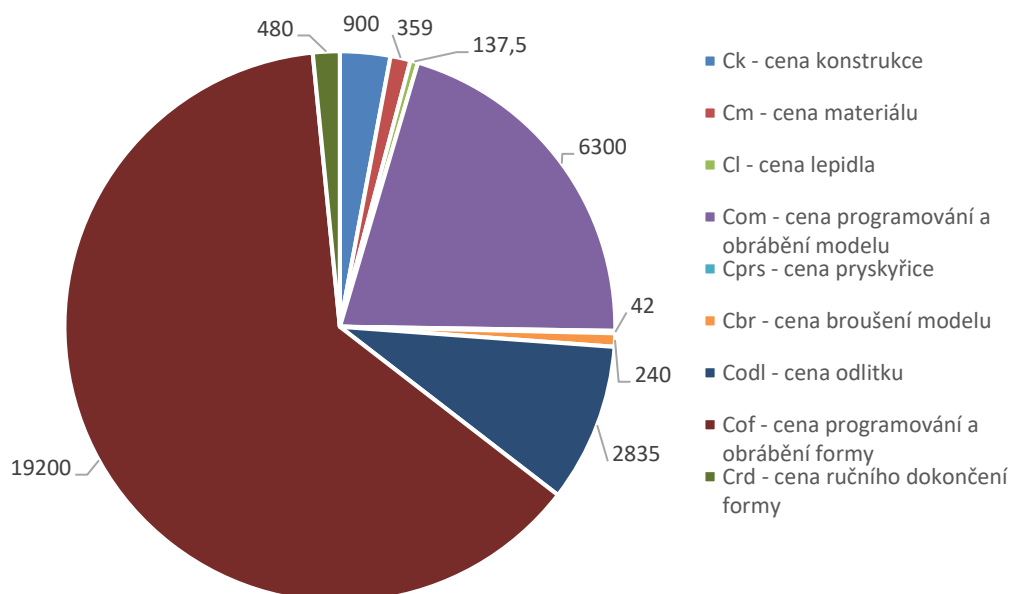
Cena formy byla spočtena dle vztahu 4.1.

$$C_f = C_k + C_m + C_l + C_{om} + C_{prs} + C_{br} + C_{odl} + C_{of} + C_{rd} \text{ [Kč]} \quad (4.1)$$

$$C_f = 900 + 359 + 137,5 + 6300 + 42 + 240 + 2835 + 19200 + 480 = 30\,493,5 \text{ Kč}$$

4.5 Rozbor ceny formy

Z grafické závislosti na obr. 4.1 je patrné, že stěžejní vliv na cenu formy mají náklady na obrábění formy. Do nákladů hodinové sazby stroje, z které vycházejí náklady na programování a obrábění formy, se započítávají i náklady na nástroje. Náklady na nástroje jsou nemalou částí této sazby, neboť jsou používány monolitní karbidové frézy. Bohužel při obrábění odlitků z pískových forem často dochází k zničení těchto nástrojů. Slévárenský písek, použitý pro výrobu forem, často není z odlitku dokonale odstraněn a při kontaktu s ostrím nástroje ho okamžitě ničí. K snížení nákladů a zlevnění výroby by mohlo vést použití nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami, nebo vyměnitelnou hlavičkou. Při použití nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami by mohlo dojít ke snížení nákladů na před-dokončovací nástroje o 60–90 % v závislosti na množství slévárenského písku na formě a zničení určitého počtu vyměnitelných břitových destiček.



Obr. 4.1 Cena formy.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala návrhem a výrobou vakuové formy pro sériové tváření plastů. V teoretické části práce byly zpracovány základní pojmy a znalosti nutné k pochopení použité technologie třískového obrábění. Byla vysvětlena a odvozena většina základních vztahů potřebných pro výpočty a uvedena v širší souvislosti.

Na teoretický rozbor navazovala část zabývající se konstrukcí formy v CAD softwaru PowerShape. Nejprve bylo pojednáno o zadaném výlisku od objednavatele. Bylo upozorněno na chyby v konstrukci tohoto dílu pro zadanou technologii a byly rozebrány technologické podmínky, které je nutné zohlednit při konstrukci formy. Závěrem byla vybrána varianta rozložení dílů na formě a forma zkonstruována.

Výrobní část diplomové práce byla rozdělena do 2 stěžejních kapitol, a to na výrobu modelu pro zaformování a na výrobu samotné formy z odlitku. V kapitole pojednávající o výrobě modelu pro zaformování bylo pojednáno o přípravě dat v CAD softwaru, o jejich použití v CAM softwaru a o výrobě modelu pro zaformování. Byl také definován stroj a strojní vybavení nutné k výrobě modelu. Následovala kapitola zabývající se výrobou formy z odlitku z hliníkové slitiny. V této části bylo pojednáno o hliníkové slitině, byl detailně rozebrán způsob upnutí odlitku do stroje a byly popsány jednotlivé kroky nutné k výrobě formy. Následoval popis způsobu ručního dokončení formy a kontrola formy. Během kontroly na 3D souřadnicovém měřicím přístroji byla zjištěna maximální odchylka - 0,14 mm, způsobená ručním dokončením formy. Tato odchylka leží v požadované toleranci $\pm 0,15$ mm. Forma je tedy vyrobena dostatečně přesně.

V technicko-ekonomickém zhodnocení byla spočtena cena formy 30 493,5 Kč. Závěrem byla navíc navržena možná cesta ke snížení nákladů na výrobu použitím nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami místo nyní používaných monolitních fréz.

Navržená forma byla vyrobena a je používána objednavatelem při výrobě plastových výlisků dle zadání.

Lze tedy konstatovat, že cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. Díl 2. 10. přeprac. vyd. V Praze: Práce, 1949.
- [2] EL-HOFY, Hassan. *Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2014. ISBN 978-1-4665-7702-2.
- [3] HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. část*. [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [4] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. *Příručka obrábění-kniha pro praxi*. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cutting – A Practical Handbook*. ISBN 91-972299-4-6.
- [5] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [6] PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. CERM 1.vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80-24-4025-8
- [7] CHLADIL, Josef a Erich MOUKA. *Teorie obrábění*. Brno: Ediční středisko VUT, 1989, 193 s. : il., tabulky, grafy.
- [8] CHLADIL, Josef. *Přednášky předmětu HTO* [přednáška]. Brno: VUT, 5.2.2018-4.5.2018.
- [9] FIALA, Zdeněk. *Přednášky předmětu HEI* [přednáška]. Brno: VUT, 24.9.2018-21.12.2018
- [10] Sandvik AB. *Výpočtové vztahy a definice pro frézování* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>
- [11] Sandvik AB. *ISO H Tvrdná ocel* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_h_hardened_steel/pages/default.aspx
- [12] PIEKARSKI, Cassiano Moro, Antonio Carlos DE FRANCISCO, Leila Mendes DA LUZ, João Luiz KOVŮLESKI a Diogo úparecido Lopes SILVŮ. *Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil. Science of the Total Environment* [online]. Elsevier B.V, 2017, 575(1), 103-111 [cit. 2017-03-25]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.10.007. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0048969716321738>
- [13] DDL - Dřevozpracující družstvo. *Dřevovláknité desky MDF (LUHOPOL)* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <http://www.ddl.cz/produkty-a-sluzby/drevovlaknity-desky-mdf-luhopol.html>
- [14] SAHOS S.R.O. *Návod na použití, obsluhu a údržbu 3,4 a 5-ti osého modelářského obráběcího centra na polystyren a dřevo typové řady SPRINT FC 2300 CNC A FC 2800 CNC*. Hrejkovice, 2001.

- [15] JJ TOOLS Co., Ltd. *2LEM High speed* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: http://www.jjtools.co.kr/bbs/board.php?bo_table=pr3&wr_id=29&page=2
- [16] Karl-Heinz Arnold GmbH: ARNO - Werkzeuge. *Milling Flip Catalog* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: https://www.arno-tools.co.uk/katalog/01_5_o/files/assets/basic-html/page-1.html#
- [17] HHW - Hommel Hercules Werkzeughandel CZ/SK, s.r.o. *Katalog nástrojů* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.hhw.cz/uploads/PDF/1/>
- [18] ČSN 42 4384 (424384) *A Slitina hliníku na odlitky 42 4384 AlSi10CuMn*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1987. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [19] SPOJENÉ SLÉVÁRNY, spol. s r.o. *Prospekt* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://www.spojeneslevarny.cz/file.php?nid=16676&oid=6199223>
- [20] PILART s.r.o. *Katalogy* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://www.pilart.cz/soubory/katalogy/Sahos-Power-2804201308362544045.pdf>
- [21] Dřevoobráběcí stroje s.r.o. *CNC obráběcí centra* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://drevoobrabeci-stroje.cz/cnc-obrabeci-centra/sahos-2/power>
- [22] Würth, spol. s r.o. *SPIRÁLOVÝ VRTÁK HSS DIN 338 TYP RN* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://media.wuerth.com/stmedia/shop/catalogpages/LANG_cs/1240611.pdf
- [23] Würth, spol. s r.o. *NC STROJNÍ VÝSTRUŽNÍKY H7 HSCO WN* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://media.wuerth.com/stmedia/shop/catalogpages/LANG_cs/1274104.pdf
- [24] Würth, spol. s r.o. *SPIRÁLOVÝ VRTÁK HSS DIN 338 TYP RW* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://media.wuerth.com/stmedia/shop/catalogpages/LANG_cs/3126465.pdf
- [25] Würth, spol. s r.o. *STROJNÍ ZÁVITNÍK HSCO DIN 371/376* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://eshop.wuerth.cz/Strojni-zavitnik-HSCo-viceucelovy-slepy-otvor-DIN-371-376-STR-ZAVIT-SLEP-OTV-MULTI-DIN371-M8/0658800800.sku/cs/CZ/CZK/>
- [26] Würth, spol. s r.o. *RÝSOVACÍ JEHLA Z TVRDOKOVU* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <https://eshop.wuerth.cz/Rysovaci-jehla-znbsptvrdokovu-KARBIDOVA-JEHLA/08916385.sku/cs/CZ/CZK/>
- [27] JJ TOOLS Co., Ltd. *2HCBG Power Speed* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://www.jjtools.co.kr/bbs/board.php?bo_table=pr13&wr_id=3
- [28] TIŠNOVSKÝ, J. *Návrh výroby vakuové formy pro tváření plastů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A_D	[mm ²]	Obsah průřezu třísky
A_{ch}	[mm ²]	Obsah průřezu třísky
A_α	[-]	Hřbet nástroje
A'_α	[-]	Vedlejší hřbet nástroje
A_γ	[-]	Čelo nástroje
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
b_d	[mm]	Odebíraná šířka třísky
b_{dc}	[mm]	Odebraná šířka třísky
C_{Fc}	[-]	Materiálová konstanta
C_{Ff}	[-]	Materiálová konstanta
C_{Fp}	[-]	Materiálová konstanta
C_{br}	[Kč]	Cena ručních prací
C_f	[Kč]	Cena formy
C_k	[Kč]	Cena konstrukce
C_{kc}	[-]	Materiálová konstanta
C_l	[Kč]	Cena lepidla
C_m	[Kč]	Cena materiálu
C_{odl}	[Kč]	Cena odlitku
C_{of}	[Kč]	Cena programování a obrábění formy
C_{om}	[Kč]	Cena programování a obrábění modelu
C_{prs}	[Kč]	Cena pryskyřice
C_{rd}	[Kč]	Cena ručního dokončení formy
D_n	[mm]	Průměr řezné části nástroje
d_n	[mm]	Průměr stopky nástroje
E	[J]	Práce procesu řezání

E_{disp}	[J]	Práce potřebná k vytvoření nových povrchů
E_e	[J]	Práce potřebná k překonání elastických deformací v materiálu obrobku
E_p	[J]	Práce potřebná k překonání plastických deformací v materiálu obrobku
E_t	[J]	Práce tření potřebná k překonání tření na čele a hřbetě nástroje
e_c	[J.cm ⁻³]	Měrná práce řezání
F	[N]	Výslednice sil
F_c	[N]	Řezná část výslednice sil
F_e	[N]	Pracovní síla
F_f	[N]	Posuvová část výslednice sil
F_ϕ	[N]	Tečná část výslednice sil, působící v rovině max. smykových napětí
$F_{\phi N}$	[N]	Normálová část výslednice sil, působící v rovině max. smykových napětí
F_γ	[N]	Tečná část výslednice sil, působící na čele nástroje
$F_{\gamma n}$	[N]	Normálová část výslednice sil, působící na čele nástroje
f	[mm]	Posuv na otáčku
h_d	[mm]	Odebíraná tloušťka třísky
h_{dc}	[mm]	Odebraná tloušťka třísky
h_n	[mm]	Délka vyložení nástroje z kleštinového upínače
k_c	[MPa]	Měrný řezný odpor
k_{cl}	[MPa]	Měrná řezná síla
k_h	[-]	Koeficient přechování třísky
L_n	[mm]	Celková délka nástroje
l	[mm]	Délka pohybu nástroje
l_c	[mm]	Délka odebrané třísky
l_n	[mm]	Délka ostří nástroje
m_c	[-]	Koeficient fyzikálních vlastností obrobku
P	[W]	Výkon

P_c	[W]	Řezný výkon
P_e	[W]	Pracovní výkon
P_f	[W]	Výkon potřebný pro posuv
p_c	[W.cm ⁻³]	Měrný řezný výkon
Q	[J]	Celkové teplo
Q_D	[J]	Teplo vzniklé v oblasti primární deformace
Q_n	[J]	Teplo odvedené nástrojem
Q_o	[J]	Teplo odvedené obrobkem
Q_p	[J]	Teplo odvedené prostředním
Q_{tr}	[J]	Teplo odvedené třískou
Q_α	[J]	Teplo vzniklé v oblasti hřbetu
Q_γ	[J]	Teplo vzniklé v oblasti sekundární plastické deformace
S	[-]	Hlavní ostří nástroje
S'	[-]	Vedlejší ostří nástroje
S_e	[-]	Pracovní hlavní ostří
t_{sout}	[min]	Doba trvání řezného procesu
u	[-]	Konstanta
V_{ch}	[mm ³]	Objem odebrané třísky
V_{m1}	[mm ³]	Objem odebíraného materiálu
V_{m2}	[dm ³]	Objem odebraného materiálu
V_t	[dm ³]	Objem volně ložených třísek
v	[-]	Konstanta
v_c	[m.min ⁻¹]	Řezná rychlost
v_e	[m.min ⁻¹]	Výsledná rychlost řezného pohybu
v_f	[m.min ⁻¹]	Posuvová rychlost
v_γ	[m.min ⁻¹]	Rychlost třísek
v_ϕ	[m.min ⁻¹]	Skluzová rychlost
W	[-]	Objemový součinitel třísek
x_{Fc}	[-]	Konstanta
x_{Ff}	[-]	Konstanta
x_{Fp}	[-]	Konstanta

y_{Fc}	[-]	Konstanta
y_{Ff}	[-]	Konstanta
y_{Fp}	[-]	Konstanta
ϕ	[°]	Úhel střižné roviny
α_o	[°]	Nástrojový ortogonální úhel hřbetu
γ_o	[°]	Nástrojový ortogonální úhel čela
δ_o	[°]	Nástrojový ortogonální úhel řezu
$\dot{\epsilon}$	[s ⁻¹]	Rychlost deformace
λ_t	[°]	Nástrojový úhel sklonu hlavního ostří
ν	[°]	Rozdíl úhlů v rovině
τ	[MPa]	Smykové napětí
Δy	[mm]	Tloušťka vrstvy ve skluzové rovině
Δs	[mm]	Posunutí vrstvy
Δt	[mm]	Doba trvání
$\Delta \epsilon$	[mm]	Deformace

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
MDF	Dřevovláknitá deska
WC	Karbid wolframu
TiSiN	Nitrid křemíku titanu
TiAlN	Nitrid hliníku titanu
TiN	Nitrid titanu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Jakostní osvědčení
Příloha 2	Měřicí protokol plochy 1
Příloha 3	Měřicí protokol plochy 2
Příloha 4	Měřicí protokol čela 1
Příloha 5	Měřicí protokol čela 2
Příloha 6	Měřicí protokol kapsy 1
Příloha 7	Měřicí protokol kapsy 2
Příloha 8	Měřicí protokol boku 1
Příloha 9	Měřicí protokol boku 2

PŘÍLOHA 1 – JAKOSTNÍ OSVĚDČENÍ



JAKOSTNÍ OSVĚDČENÍ

(Inspection certificate, Abnahmeprüfzeugnis)
(according to, gemäss)
EN 10204 - 3.1



Saker spol. s.r.o. - o.z. ALUSAK

Číslo objednávky:
(Order number, Auftragsnummer):

Odběratel:
(Customer, Abnehmer):

Datum odeslání:
(Despatched on, Expediert am):

Druh výrobku:
(Product, Artikel):

Barevné označení:
(Colour code, Farbmarkierung):

Počet svazků:
(Number of bundles, Anzahl der Bunde):

Hmotnost-Netto:
(Nett Weight, Nettogewicht):

Příjemce:
(Delivery, Empfänger):

Výrobce: **SAKER spol. s.r.o., o.z. ALUSAK**
(Producer, Produzent):

Metoda analýzy: měřeno na zařízení MAGELAN QUANTRON Q8
(Method of analysis, Analysenmethode):

Číslo tavby Smelting No. Charge Nr.	Počet kusů Pieces Stücke	Hmotnost Mass Masse Netto-kg	Chemické složení - obsah v % Chemical composing - Content in %, Chemische Zusammensetzung - Gehalt in %											
			Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	
			8,000		0,500	0,300								
			11,000	0,800	1,500	0,600	0,600	0,100	0,400	0,800	0,350	0,250	0,200	
9/11/18-1818	2	2 255	8,657	0,650	0,990	0,397	0,336	0,034	0,022	0,721	0,024	0,000	0,050	
Celkem: Total, Gesamt	2	2 255												

Diese Lieferung ist Kontaminationsfreiheit (Radioaktivität) nach norm EN 10 204

	RZ:(Car number, Kennzeichen)

Kroměříž, Datum: 11.04.2019
(Date, Datum):

Razítko:
(Stamp, Stempel):

Kontrola:
(Control, Kontrolle):

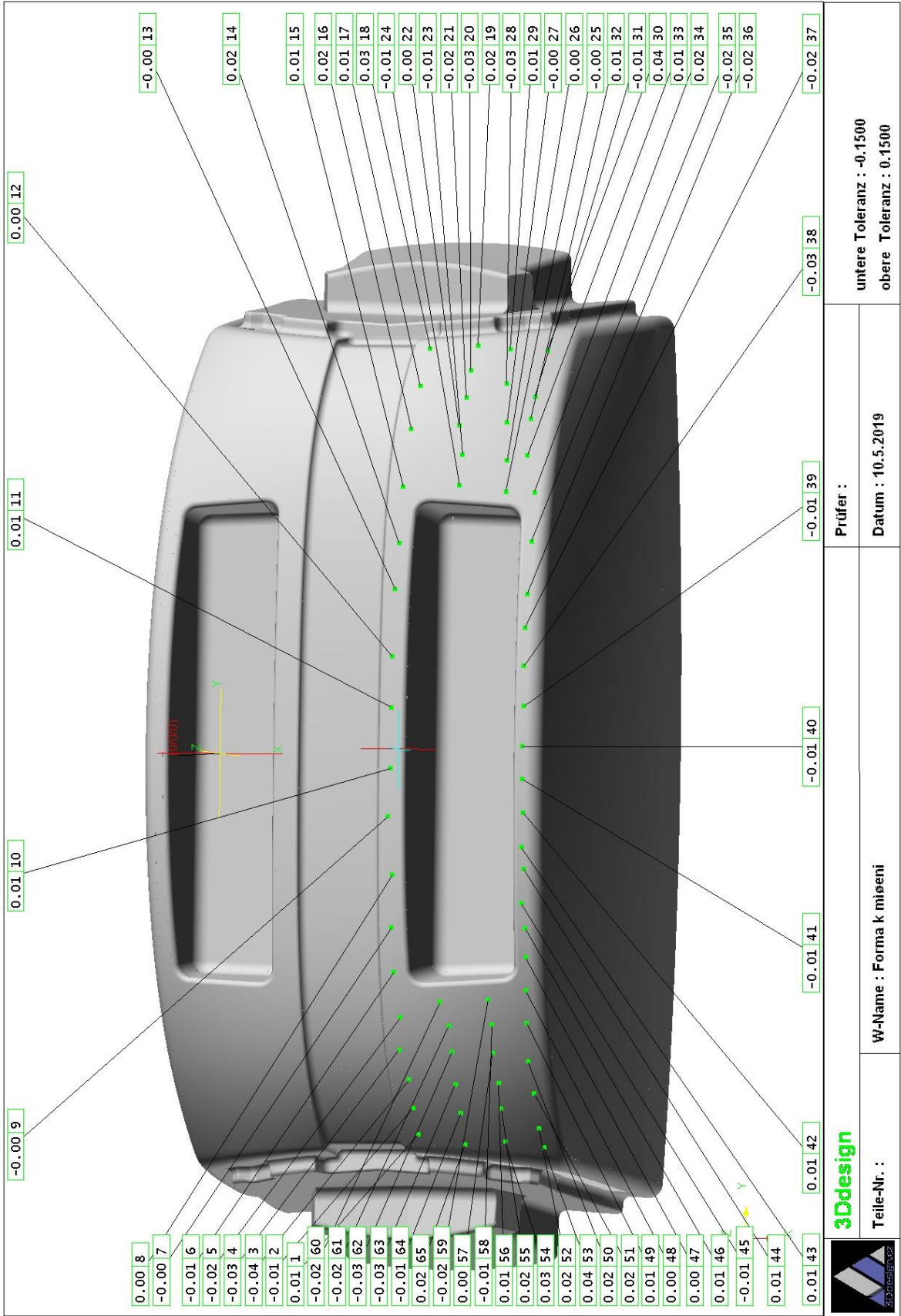
Vystavil:
(Made out by, Ausgefertigt):

Společnost je zapsána u Krajského soudu v Brně, oddíl C, v
The company is listed in Business Register of District Court in Brno, Section C
Die Gesellschaft wird im Handelsregister des Bezirksgerichts im Brno, Abteil C, Einlage Nr. 0275 geführt

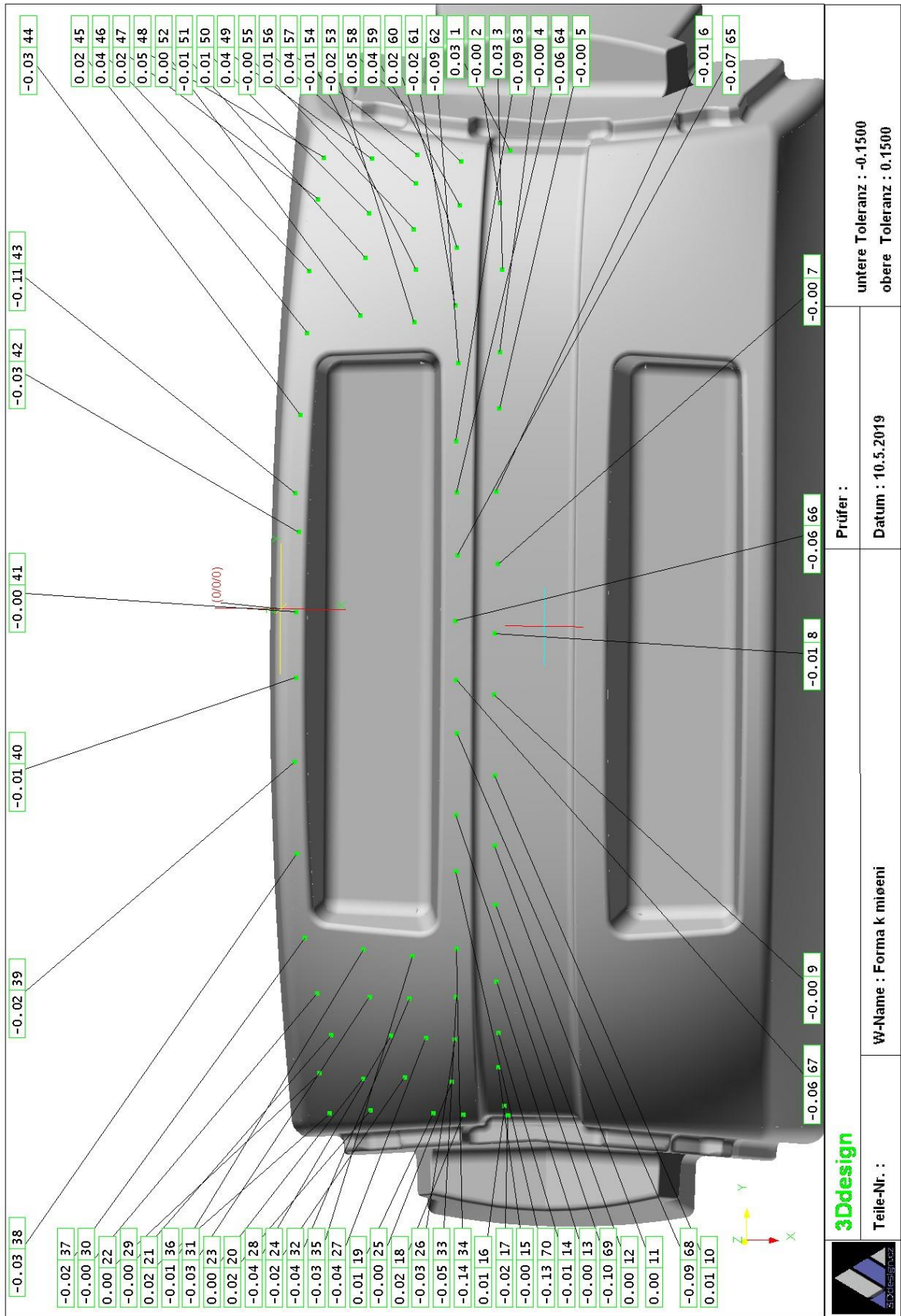
SAKER spol. s.r.o., o.z. ALUSAK

Na Sádkách 3572, 767 01 Kroměříž, Czech Republic
Tel.: 00420 573 334 331, fax: 00420 573 331 224, e-mail: info@saker.cz

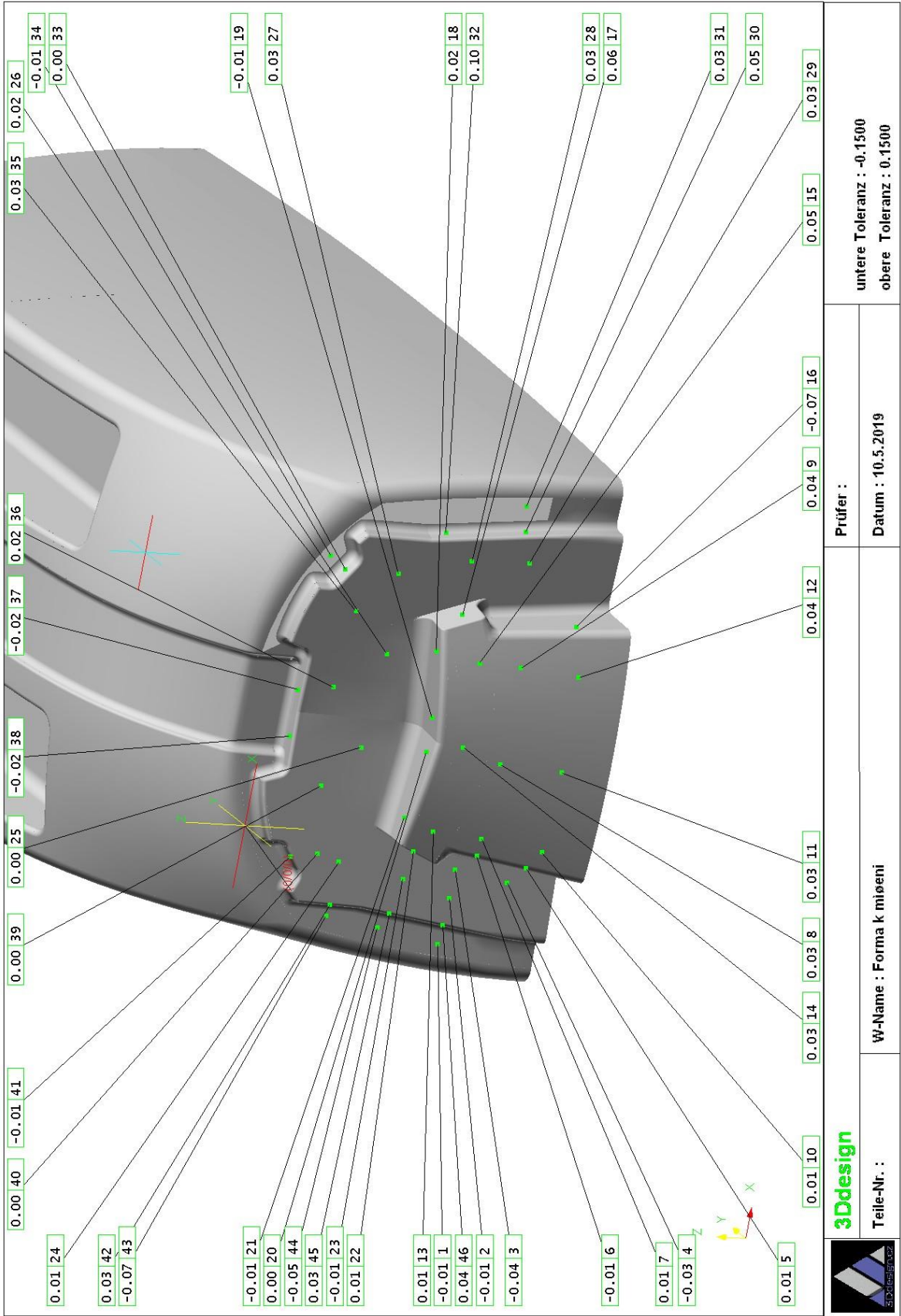
PŘÍLOHA 2 – MĚŘICÍ PROTOKOL PLOCHY 1



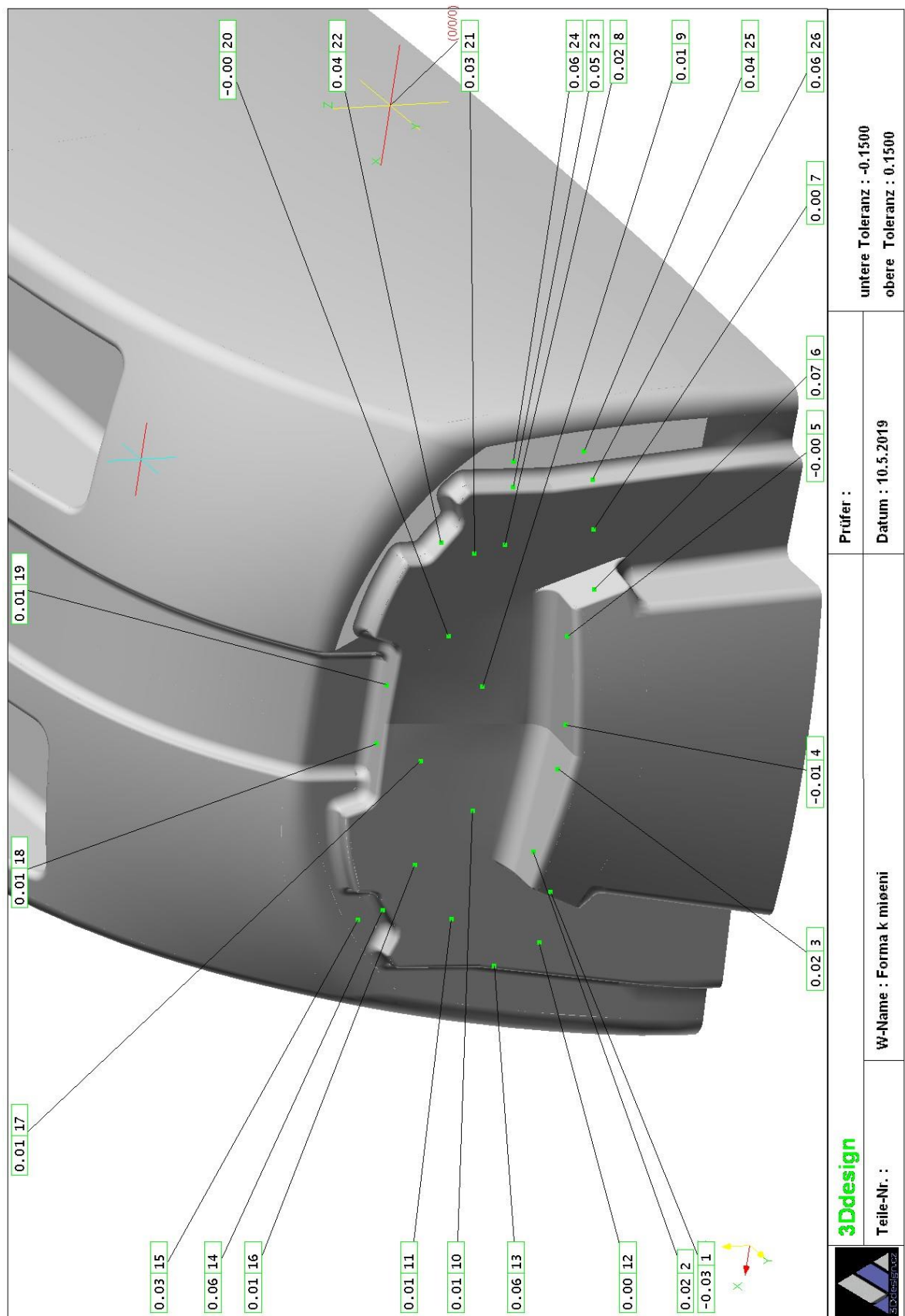
PŘÍLOHA 3 - MĚŘICÍ PROTOKOL PLOCHY 2



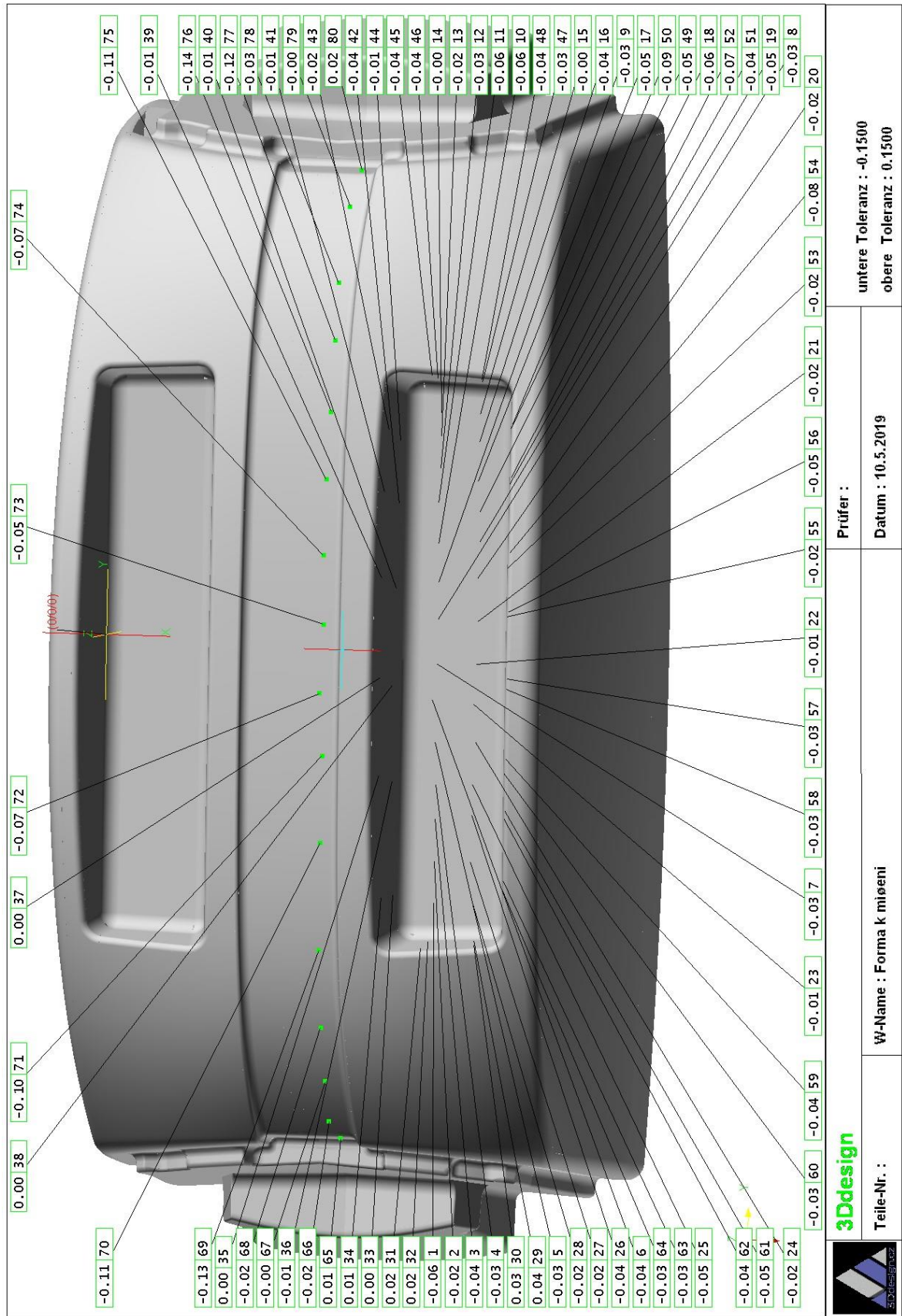
PŘÍLOHA 4 – MĚŘICÍ PROTOKOL ČELA 1



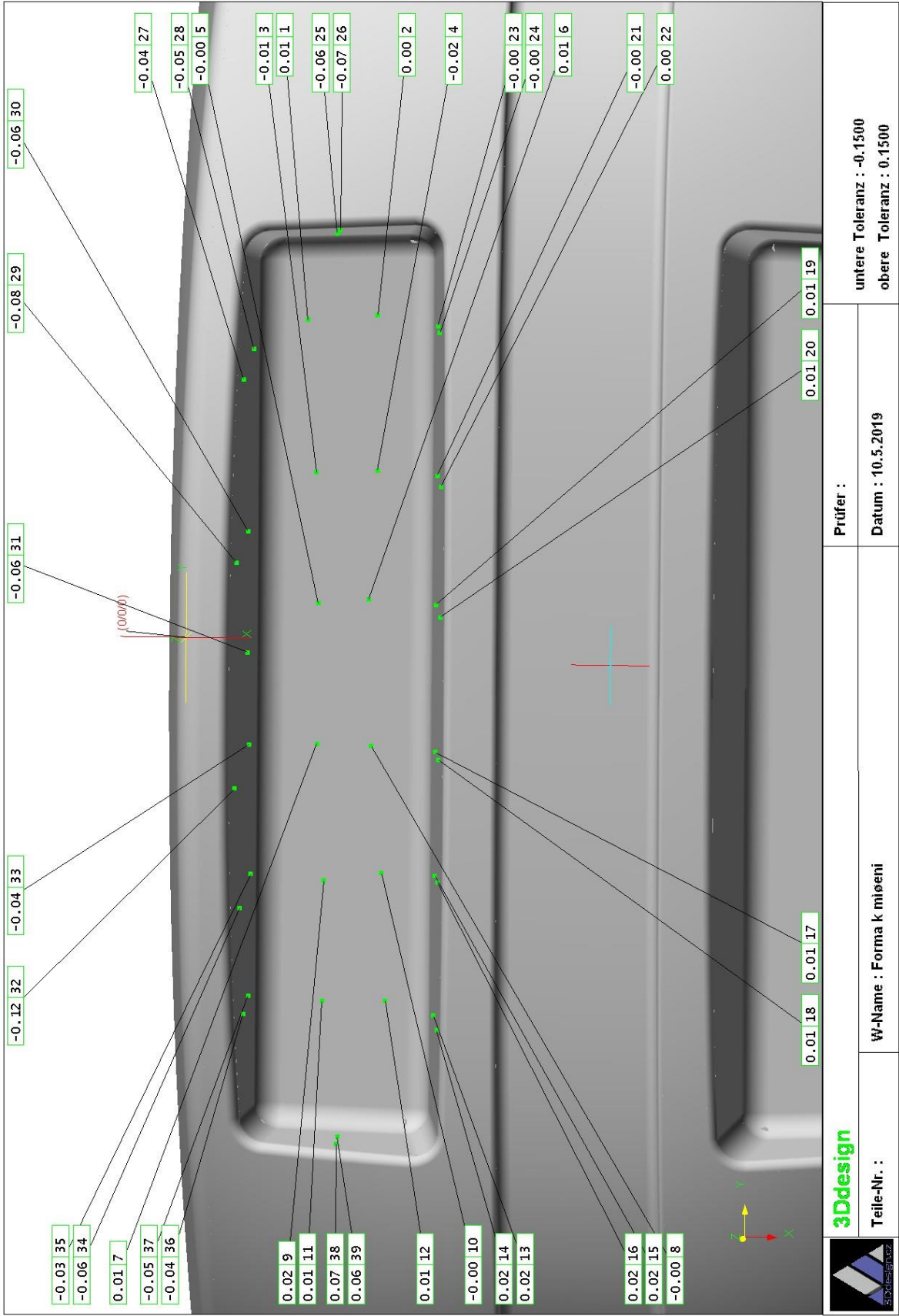
PŘÍLOHA 5 – MĚŘICÍ PROTOKOL ČELA 2



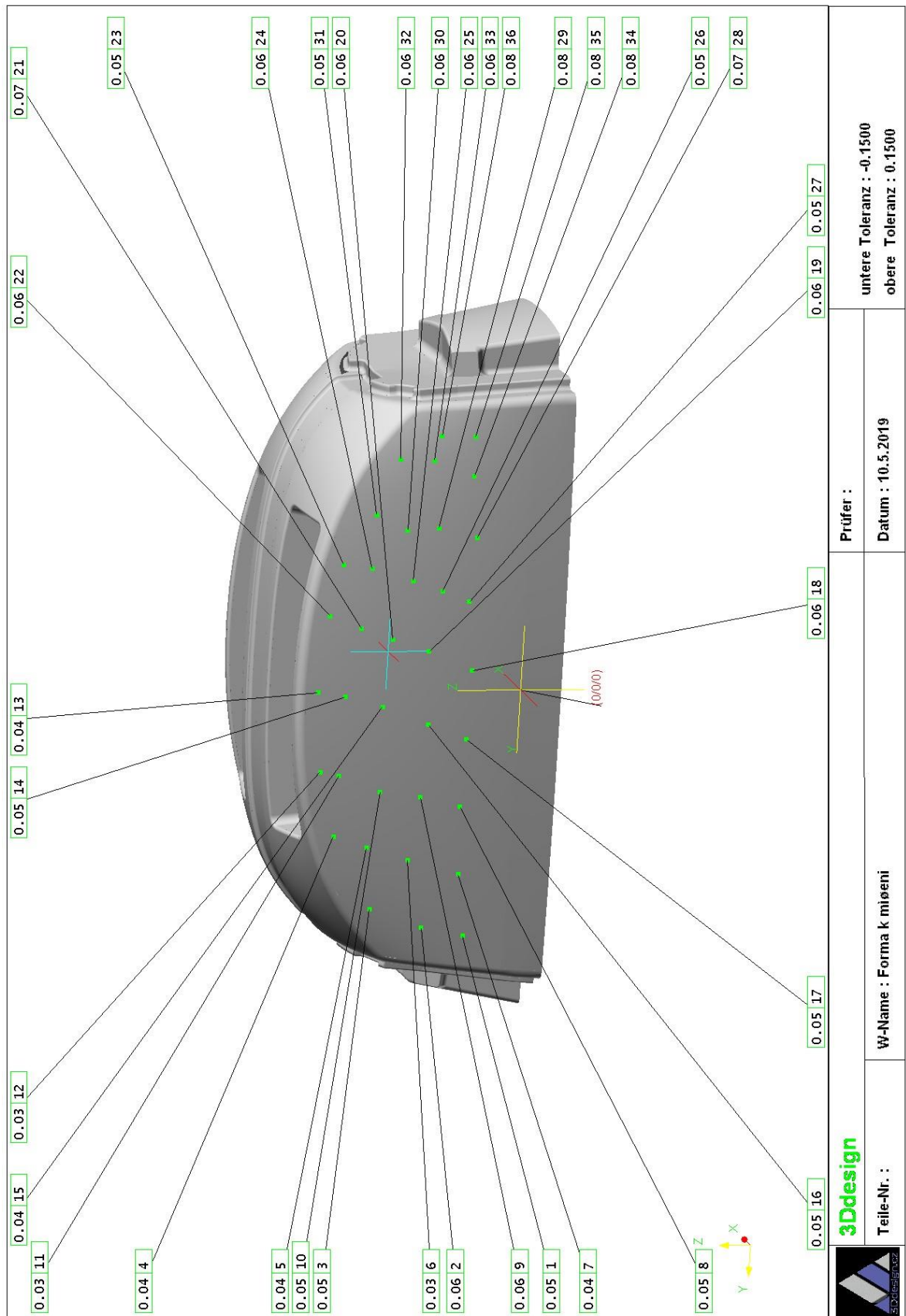
PŘÍLOHA 6 – MĚŘICÍ PROTOKOL KAPSY 1



PŘÍLOHA 7 – MĚŘICÍ PROTOKOL KAPSY 2



PŘÍLOHA 8 – MĚŘICÍ PROTOKOL BOKU 1



PŘÍLOHA 9 – MĚŘICÍ PROTOKOL BOKU 2

